



Miguel de Abreu Bento

Licenciado em Engenharia de Materiais

**Avaliação de emissões de
nanopartículas resultantes do
processo de soldadura MAG.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Soldadura

Orientadora: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
(DEMI,FCT-UNL)

Co-orientador: Prof. Doutor João Fernando Pereira
Gomes
(ADEQ,ISEL/IPL)

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Vogais: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda
Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2013

COPYRIGHT

Estudo de avaliação de emissões de nanopartículas resultantes do processo de soldadura MAG

Copyright©Miguel de Abreu Bento, FCT-UNL, 2013

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, e ao meu co-orientador Professor Doutor João Gomes, pelo empenho e dedicação dispensado à realização desta dissertação.

À Professora Doutora Patrícia Carvalho do Microlab do IST, agradeço a disponibilidade e a ajuda prestada na análise TEM e EDS.

Ao Engenheiro João Gonzales, agradeço pela ajuda prestada, no funcionamento da mesa de soldadura.

Aos Senhores António Campos e Paulo Magalhães, um agradecimento pela assistência técnica prestada ao longo deste trabalho.

Aos meus colegas Tiago Rio Pereira e Catarina Pereira, agradeço toda a ajuda prestada na realização da parte experimental deste trabalho.

Aos Engenheiros, Ricardo Crespo e Bruno Salgueiro, o meu agradecimento por me terem fornecido o material de base necessário para realizar este trabalho.

Ao Engenheiro Pedro Lança, agradeço o fornecimento dos consumíveis utilizados para a parte experimental deste trabalho.

Um obrigado a todos os amigos que contribuíram para a realização deste trabalho, quer com sugestões quer com o apoio que é sempre muito importante.

Um obrigado muito especial, para a minha namorada, que sempre me apoiou e motivou para a realização da dissertação.

Também agradeço muito à minha família, aos meus pais, tios, irmão e minha prima que sempre me apoiaram em tudo.

RESUMO

Os processos de soldadura por fusão são dos processos mais utilizados na indústria metalomecânica para a ligação de materiais.

Estes processos de soldadura libertam fumos, que são uma mistura de partículas sólidas e gases. Mais de 90 % dos fumos gerados são devidos à vaporização dos constituintes presentes nos consumíveis.

Quanto menor for a dimensão dessas partículas, mais perigosas são para a saúde das pessoas que estão envolvidas nos processos de soldadura por fusão. Daqui resulta a importância deste estudo, que envolve a análise da libertação de nanopartículas durante o processo de soldadura MAG.

O principal objectivo deste estudo foi efectuar a análise das partículas libertadas durante o processo de soldadura MAG e sua caracterização, para diferentes modos de transferência e várias misturas gasosas utilizadas em soldadura, para um aço não ligado e um aço inoxidável austenítico.

Foram realizados diversos ensaios, com parâmetros de soldadura diferentes, e para diferentes gases de soldadura, sendo determinada a área superficial depositada nos alvéolos pulmonares das nanopartículas, que foram ainda recolhidas e caracterizadas através de microscopia electrónica de transmissão.

Verificou-se a existência de nanopartículas, com uma elevada capacidade de deposição alveolar, que podem provocar danos na saúde dos trabalhadores expostos a este processo de soldadura. Também foi verificado que os modos de transferência e as misturas gasosas têm influência nas áreas de superfície das partículas com capacidade de se depositarem na região alveolar.

PALAVRAS-CHAVE

- Soldadura por fusão
- *Metal Active Gas* (MAG)
- Fumos de soldadura
- Nanopartículas
- Gases de soldadura
- Modos de transferência

ABSTRACT

Fusion welding processes are the most used in the metalworking industry for joining materials.

These welding processes generate fumes that are a mixture of solid particles and toxic gases. More than 90 % of the fumes are generated due to the vaporization of constituents present in consumables.

The smaller the size of these particles, the most dangerous to the health of people who are involved in the process of fusion welding. This is why this study is important since it involves the analysis of the release of nanoparticles for the MAG welding process.

The main objective of this study was to carry out the analysis of the particles released during MAG welding process and its characterization as function of different transfer modes and various gas mixtures used in welding for a carbon steel and an austenitic stainless steel.

Tests were carried out varying the welding parameters for different welding gas mixtures, the surface area of nanoparticles deposited in the alveolar tract was determined. These particles were collected and characterized by transmission electron microscopy.

The existence of nanoparticles with a high capacity of alveolar deposition was verified, and they can cause damage to the health of workers exposed to this welding process. It was also verified that the transfer modes and gaseous mixtures will have influence in the area of particle surface with ability to deposit in the alveolar region.

KEY-WORDS

- Welding fusion
- *Metal Active Gas* (MAG)
- Welding fumes
- Nanoparticles
- Shielding gases
- Transfer modes

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
NOMENCLATURA	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objectivos	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. Arco Eléctrico	5
2.2. Tipos de corrente e polaridade	9
2.3. Transferência do Metal Fundido	9
2.4. Processo de Soldadura MAG	13
2.4.1. Princípio de Funcionamento do Processo MAG	15
2.4.2. Fontes de Energia	16
2.4.3. Modos de Transferência	18
2.4.4. Gases de Protecção	22
2.5. Emissão de fumos na Soldadura.....	26
2.6. Nanopartículas.....	30
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1. Objectivos a Cumprir	35
3.2. Materiais Utilizados	36
3.2.1. Materiais de Base	36
3.2.2. Material de adição	38
3.2.3. Gases de Soldadura	38
3.3. Realização das Soldaduras	40
3.3.1. Equipamento utilizado.....	40
3.3.2. Experimentação de Soldadura	44
3.3.3. Parâmetros Operatórios de Soldadura	44

3.4.	Medição da área superficial de nanopartículas.....	47
3.4.1.	Equipamento utilizado.....	47
3.4.2.	Experimentação da recolha de nanopartículas para medição da área superficial	48
3.5.	Recolha de nanopartículas.....	50
3.5.1.	Equipamento utilizado.....	50
3.5.2.	Experimentação para a recolha de nanopartículas.....	52
3.6.	Análise por microscopia electrónica de transmissão.....	52
3.7.	Conclusão.....	53
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
4.1.	Introdução	55
4.2.	Resultados obtidos no NSAM.....	55
4.2.1.	Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 21	56
4.2.2.	Ensaio realizado com a mistura gasosa Atal	57
4.2.3.	Ensaio realizado com o gás dióxido de carbono	59
4.2.4.	Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 121	61
4.2.5.	Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 129	63
4.2.6.	Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 12	65
4.3.	Discussão dos resultados obtidos no NSAM.....	67
4.4.	Resultados da microscopia.....	70
4.4.1.	Resultados da análise morfológica.....	70
4.4.2.	Resultados da análise química.....	75
5.	CONCLUSÕES.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.Representação esquemática das diferentes zonas de arco.....	6
Figura 2.2– Forças que actuam na gota de material de adição fundido	10
Figura 2.3.Destacamento da gota com polaridade directa DC(-) [11]	14
Figura 2.4. Esquema de uma máquina de soldadura MAG[13]	15
Figura 2.5.Princípio de funcionamento MAG[14]	16
Figura 2.6.Curva característica da fonte de alimentação, intensidade constante	17
Figura 2.7.Curva característica da fonte de alimentação, tensão constante ou plana.....	17
Figura 2.8.Sequência de fenómenos que ocorrem na soldadura MAG pelo modo de transferência por curto-circuito.....	20
Figura 2.9.Transferência globular	21
Figura 2.10.Transferência por <i>Spray</i>	22
Figura 2.11.Propriedades dos gases utilizados na soldadura.....	23
Figura 2.12.Morfologia de cordão recorrendo ao gás de protecção árgon.....	24
Figura 2.13.Morfologia do cordão recorrendo ao gás de protecção dióxido de carbono	25
Figura 2.14.Morfologia do cordão recorrendo ao gás de protecção Hélio.....	26
Figura 2.15.Libertação de partículas [16]	27
Figura 2.16 Representação da variação da taxa de formação de fumos com uma mistura gasosa de Ar+ 2%CO ₂ na soldadura de um aço ao carbono [18]	28
Figura 2.17.Representação da taxa de formação de fumos (TFF) Em função da Tensão e da Intensidade de Soldadura [16].....	29
Figura 2.18. Influência das misturas gasosas na taxa de formação de fumos [16].....	29
Figura 2.19.Efeitos potenciais sobre o organismo [19].....	31
Figura 2.20.Curvas de deposição na zona traqueobrônquial e alveolar do pulmão [5].....	33
Figura 3.1. Dimensões da chapa de aço ao carbono utilizada	36
Figura 3.2.Dimensões da chapa de aço inoxidável utilizada.....	37
Figura 3.3. Máquina de soldar ProMig 501 Kemppi.....	41
Figura 3.4. Painel da máquina de soldadura.....	42
Figura 3.5.Mesa de soldadura desenvolvida no DEMI, FCT UNL [5]	43
Figura 3.6.Local onde foram efectuados os trabalhos de soldadura e sistema de extracção de fumos.....	44
Figura 3.7.NSAM, Modelo 3550 da TSI [20]	47
Figura 3.8. Esquema de funcionamento do NSAM [5]	48
Figura 3.9.Esquema do ponto de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas, na tocha de soldadura	49
Figura 3.10 Esquema do ponto de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas, na máscara de soldadura.	50
Figura 3.11 NAS modelo 3089 TSI [21].....	51
Figura 3.12. Princípio de funcionamento do NAS [5]	51
Figura 3.13.Esquema da recolha de partículas libertadas.....	52
Figura 3.14.Microscópio Electrónico de Transmissão Hitachi H-8100 II	53
Figura 4.1. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 21	56

Figura 4.2. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 21.....	57
Figura 4.3. Ensaio para a mistura gasosa Atal	58
Figura 4.4. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Atal.....	59
Figura 4.5. Ensaio para o gás 100 % CO ₂	60
Figura 4.6. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para o gás 100 % CO ₂	61
Figura 4.7. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 121	62
Figura 4.8. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 121.....	63
Figura 4.9. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 129	64
Figura 4.10. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 129.....	65
Figura 4.11. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 12	66
Figura 4.12. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 12.....	67
Figura 4.13. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 21, a uma escala de 200 nm.....	70
Figura 4.14. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 21, a uma escala de 1000 nm.....	71
Figura 4.15. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 121, a uma escala de 1000 nm.....	72
Figura 4.16. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 121, a uma escala de 200 nm.....	72
Figura 4.17. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 129, a uma escala de 200 nm.....	73
Figura 4.18. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 129, a uma escala de 2000 nm.....	74
Figura 4.19. Análise EDS para o aço ao carbono, com mistura gasosa Arcal 21	75
Figura 4.20. Figura 4.21. Análise EDS para o aço inoxidável austenítico, com mistura gasosa Arcal 129.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Efeitos na saúde dos elementos libertados através de fumos de soldadura	30
Tabela 3.1. Composição química do material base (Aço ao Carbono)	36
Tabela 3.2. Composição química AISI 304	37
Tabela 3.3. Composição química do fio sólido ER70S-6	38
Tabela 3.4. Composição química do fio sólido ER316 LSi	38
Tabela 3.5. Descrição dos gases utilizados na soldadura das chapas de aço ao carbono	39
Tabela 3.6. Parâmetros de soldadura utilizados no Aço ao Carbono.	45
Tabela 3.7. Parâmetros de soldadura utilizados no Aço Inoxidável Austenítico	46
Tabela 4.1. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 21 ..	56

Tabela 4.2.Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Atal	58
Tabela 4.3.Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo ao gás 100 % CO ₂	60
Tabela 4.4.Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 121	61
Tabela 4.5. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129	63
Tabela 4.6.Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129	65
Tabela 4.7.Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios com o material de base aço ao carbono.....	68
Tabela 4.8.Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios utilizando o material de base aço inoxidável austenítico	69

NOMENCLATURA

a	Região Alveolar
ACGHI	<i>American Conference of Government Industrial Hygienists</i> (Conferência dos higienistas Governamentais Industriais Americanos)
AWS	<i>American Welding Society</i> (Sociedade Americana de Soldadura)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
CCPD	Corrente continua polaridade directa
CCPI	Corrente continua polaridade inversa
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente continua)
DCEP	<i>Direct current electrode positive</i> (Corrente continua electrode ligado ao polo positivo)
EDS	<i>Energy dispersive x-ray spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia)
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
FCT UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa
HEPA	<i>High efficiency particulate air</i> (filtro de ar de alta eficiência)
ICEM	Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Protecção Radiológica)
IIW	<i>International Institute of Welding</i> (Instituto Internacional de Soldadura)
IST	Instituto Superior Técnico
MAG	<i>Metal active gas</i> (Metal gás activo)
MIG	<i>Metal inert gas</i> (Metal gás inerte)
NAS	<i>Nanometer Aerosol Sampler</i> (Amostrador de aerossóis nanometricos)
NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
SER	Soldadura Eléctrodos Revestidos
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Tungsténio inerte gás)
TB	Região traqueobrônquial
TEM	<i>Transmission electron microscopy</i> (Microscópio electrónico de transmissão)
TSI	<i>Trust Science Innovation, Inc</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O sector metalúrgico gera 970 mil milhões de euros por ano, o que representa cerca de 8% do volume de negócios da União Europeia. A soldadura é a técnica mais utilizada na ligação de materiais. Existem cerca de 730.000 soldadores a tempo inteiro e aproximadamente 5,5 milhões de trabalhadores que efectuem trabalhos relacionados com soldadura [1].

A soldadura por fusão é o principal processo utilizado para ligação de metais [2]. Dentro da soldadura por fusão, existem dois processos com maior destaque, soldadura por eléctrodos revestidos (SER), e soldadura por fio sólido com protecção activa (MAG), que são utilizados em cerca de 70% em construção soldada [1].

O processo MAG apresenta muitas vantagens, sendo aquela que mais se destaca a utilização de um consumível que é alimentado automaticamente, facilitando assim a automatização do processo. Esta é uma das razões que fez com que o processo MAG seja, hoje em dia, um dos mais utilizados na construção soldada em todo o mundo [3].

Neste processo a fusão do material de adição, e do material de base, é obtida através de um arco eléctrico.

Tratando-se de um dos processos de soldadura que gera uma grande quantidade de fumos, contendo partículas sólidas que podem apresentar dimensões extremamente reduzidas tais como nanopartículas; é de extrema importância saber quais os impactos que essas nanopartículas vão ter na saúde dos operadores.

Sendo a saúde dos operadores um aspecto a ter sempre em conta, é necessário aprofundar o estudo sobre a emissão de nanopartículas, por forma a poder conhecer qual o impacto que estas apresentam na saúde e quais são os principais factores que contribuem para a sua formação.

1.2.Motivação

Em estudos anteriores verificou-se que a concentração e a massa das nanopartículas podem não ter correlação directa com os seus efeitos na saúde, mas que a área superficial das nanopartículas é a característica mais relevante nesse âmbito, e é esta que vai condicionar onde as nanopartículas se vão depositar, sendo que das possíveis regiões de deposição as que mais interesse suscitam são o nariz (cabeça), devido à possibilidade de transferência de nanopartículas para o cérebro e a região traqueobrônquial e alveolar [4].

Um estudo recente, permitiu concluir que durante a fase de soldadura as nanopartículas que são emitidas apresentam dimensões inferiores a 100 nm, com elevada capacidade de deposição alveolar [5].

Contudo, torna-se necessário ir um pouco mais além, face a este estudo e, assim, explorar quais os parâmetros de soldadura que influenciam as emissões de nanopartículas, nomeadamente os modos de transferência e ainda a natureza das misturas gasosas utilizadas.

1.3.Objectivos

Este trabalho teve como objectivos:

- Procurar reproduzir condições análogas às encontradas na indústria;
- Caracterizar as partículas em função da sua concentração e composição;
- Recolher as partículas libertadas, durante a execução de cordões de soldadura, para análise posterior;
- Correlacionar os dados obtidos com os modos de transferência e com o tipo de misturas gasosas utilizadas.

1.4.Estrutura da dissertação

Esta dissertação estrutura-se em cinco capítulos:

1. Introdução: Descrição do enquadramento, motivação, objectivos e estrutura da dissertação.
2. Estado-da-Arte: Neste capítulo descreve-se brevemente o arco eléctrico, tipos de corrente, transferência do metal fundido, caracterização do processo MAG, emissão de fumos e, ainda, a emissão de nanopartículas.
3. Procedimento experimental: Descrevem-se neste capítulo os materiais e métodos utilizados, assim como os parâmetros de soldadura e as condições adoptadas para a realização da experimentação.
4. Resultados e discussão: neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados da investigação.
5. Conclusões: Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugerem-se tópicos para estudos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Arco Eléctrico

O arco eléctrico foi descoberto entre 1801 e 1808 por Humphrey Davis [6], mas só foi patenteado como processo de soldadura em 1885 por N. Bernardos e S. Olsewski[7].

É definido como uma descarga eléctrica estável, sob baixos níveis de queda de tensão total entre dois eléctrodos, no seio de um meio plasmogénico (gás ionizado que funciona como condutor do arco eléctrico).

O eléctrodo negativo, a partir do qual são emitidos os electrões que passam através do gás designa-se por cátodo. O eléctrodo positivo é designado de ânodo.

As partículas, num arco eléctrico, podem apresentar os seguintes movimentos:

- Os electrões que partem do cátodo vão bombardear o ânodo
- Os iões positivos que retornam na direcção do cátodo
- Os iões negativos, tais como o s de oxigénio, que caminham na direcção do ânodo

Visto que a mobilidade dos electrões é muito superior (aproximadamente 100 m/s) à mobilidade dos iões (aproximadamente 1 m/s) a maior parte da corrente eléctrica utilizada no processo é conduzida pelos electrões [7].

Como resultado de vários estudos sobre o arco eléctrico foi possível obter um traçado de curvas de repartição longitudinal do potencial entre o cátodo e o ânodo [7].

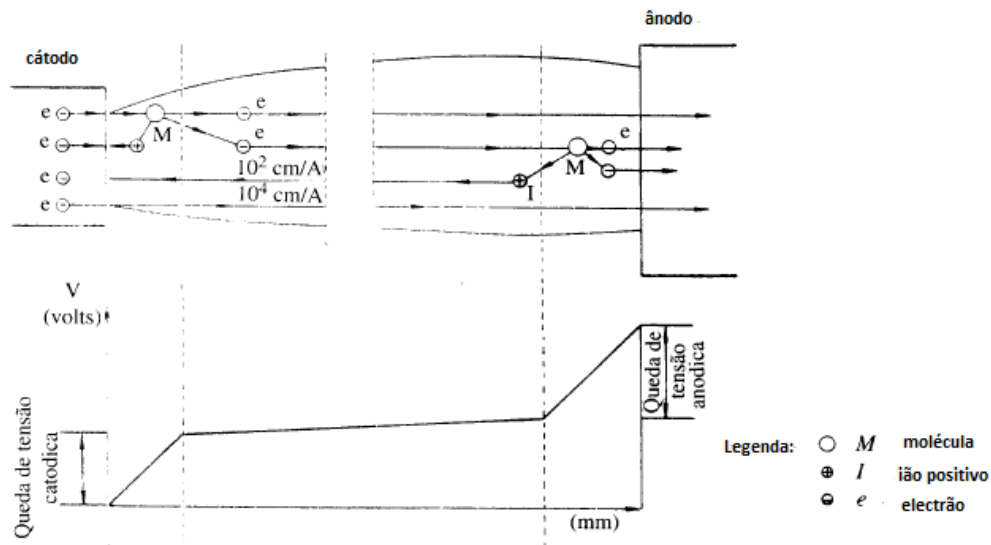


Figura 2.1.Representação esquemática das diferentes zonas de arco

Na figura 2.1 é possível observar 3 zonas distintas, correspondendo a quedas de tensão bruscas juntas ao cátodo e ao ânodo; já na coluna de arco não se verifica uma variação da tensão.

As zonas de transição catódica e anódica são locais de elevada libertação calorífica, que estão relacionadas com as quedas de tensão que se podem observar na figura 2.1. Já em relação à coluna de arco, esta apresenta-se como um meio electricamente neutro, em que a quantidade de cargas positivas é sensivelmente igual à quantidade de cargas negativas [7].

Na soldadura, o arco eléctrico conduz, na sua coluna, um meio gasoso de alta temperatura. Quando a energia calorífica por átomo de um meio gasoso é superior à energia de ligação entre electrões e o núcleo, os próprios átomos são decompostos em electrões e iões positivos, dando assim origem a um conjunto de electrões, iões positivos e partículas neutras, chamada de Plasma. Este pode atingir temperaturas elevadas desde os 5000 até aos 30000 K [8].

Com base no referido anteriormente, pode definir-se o arco eléctrico como um condutor gasoso que transforma a energia eléctrica em energia calorífica [7].

Do exposto resulta que, no arco eléctrico, é possível distinguir três zonas, que são:

- Zona de queda de tensão catódica (ZQC)
- Zona de coluna de arco (ZCA)

- Zona de queda de tensão anódica (ZQA)

Coluna de arco

Caracteriza-se pelos seguintes aspectos:

- Elevada temperatura (o plasma é mantido desde que se compensem as perdas por convecção e radiação)
- Electricamente neutra

A estabilidade da coluna de arco, está relacionada com a condutividade eléctrica do plasma. Para se obter uma boa estabilidade é necessário uma baixa energia de ionização (gasta menos energia, logo vai exigir menos tensão para manter o arco eléctrico) e uma temperatura elevada (condutividade térmica mais baixa, o que vai reter mais energia, originando, assim, um arco mais quente). A junção destes dois factores, vai fazer com que se consiga obter arcos mais estáveis. Assim sendo, a utilização de gases de protecção, com baixa energia de ionização como o argon, origina arcos mais estáveis. Em contrapartida, o hélio, devido à sua elevada energia de ionização, apresenta arcos mais instáveis [7].

Zona de Queda de Tensão Catódica

Vai ser nesta zona, que os electrões que fluem através do plasma são formados, e a facilidade e a estabilidade com que estes se formam, vai ter influência na estabilidade do arco eléctrico.

Foram desenvolvidos diversos estudos nesta área, que possibilitam perceber os fenómenos que ocorrem nesta zona.

Um desses estudos defende que, os electrões são fornecidos pelo cátodo a temperaturas elevadas através de emissão termoiónica. Os electrões são acelerados na zona de queda de tensão, aumentando assim a energia cinética que, mais tarde, vai ser perdida devido à ocorrência de colisões com átomos e moléculas na coluna de arco. Os iões então produzidos são acelerados na direcção do cátodo, dando origem a um impacto, que fará com que os iões percam energia cinética, mantendo o cátodo uma temperatura elevada [7].

Contudo, esta teoria só é válida para cátodos termoiónicos (por exemplo, eléctrodos de tungsténio), em cátodos não termoiónicos (materiais que fundem com temperaturas inferiores às necessárias para a emissão termoiónica de electrões, como por exemplo um eléctrodo revestido) não se verifica [9].

Outra teoria [7], sugere três tipos de mecanismos para explicar a zona de queda de tensão catódica, sendo eles:

- Emissão térmica (caracterizada pela ocorrência de uma mancha catódica mal definida e por uma densidade de corrente baixa de 10^3 A/cm^2 , que ocorre nos eléctrodos não consumíveis de tungsténio)
- Emissão plasmógena (associada a valores de densidade de corrente entre 10^4 a 10^7 A/cm^2 , e que é caracterizada por uma mancha catódica estacionária e uma contracção marcada na zona da coluna de arco, imediatamente adjacente ao cátodo. Ocorre em arcos de baixa corrente e elevada pressão, característicos do processo de soldadura por plasma)
- Emissão de campo (emissão catódica bem definida mas não estacionária, movendo-se com velocidades na ordem de 10^4 cm/s . A densidade de corrente varia entre de 10^5 a 10^8 A/cm^2 , e este é o tipo de mecanismo que predomina em soldadura com eléctrodos consumíveis)

Zona de Queda de Tensão Anódica

Na zona próxima do ânodo, a temperatura desce do elevado valor característico da coluna de arco para um valor mais baixo. Esta variação de temperatura vai criar uma desestabilização da continuidade do fluxo de iões: a concentração de iões positivos vai baixar, originando assim uma zona de carga negativa que é responsável pela queda de tensão.

Nesta zona há três comportamentos característicos:

- A temperatura desce dos valores da ZCA, para valores mais baixos, característicos da ZQA;
- É produzida uma determinada quantidade de iões, para fluírem para a coluna de arco;
- Os iões produzidos vão ser acelerados, e a sua temperatura aumenta até ao valor da temperatura da ZCA (dando origem a uma zona de carga negativa) [7];

Os princípios essenciais para que se obtenha um arco eléctrico estável são os seguintes [7]:

- Estabilidade da mancha catódica ou anódica no eléctrodo
- Se o eléctrodo for consumível a transferência do metal em fusão do eléctrodo para a peça deverá ser regular, em pequenas gotas de modo axial, bem dirigida e sem salpicos
- Na peça o banho de fusão deve mover-se suavemente e manter uma posição fixa em relação ao eléctrodo, ou seja, o arco deve incidir sempre na mesma zona do banho de fusão

- A corrente de soldadura deve ser estável
- O arco não se deve extinguir facilmente

2.2. Tipos de corrente e polaridade

Nos processos de soldadura por fusão, são utilizados dois tipos de corrente

- Corrente alterna
- Corrente contínua

No caso da corrente contínua, pode-se seleccionar o polo pretendido que se quer ligar à peça e ao eléctrodo. Esta escolha vai depender do tipo de processo de soldadura utilizada, do tipo de eléctrodo, da atmosfera, da potência de arco e do material de base a soldar.

No caso em que se tem o eléctrodo ligado ao polo negativo, designa-se por polaridade directa ou DC (-), e polaridade inversa ou DC (+) quando o eléctrodo está ligado ao pólo positivo.

A corrente contínua, relativamente à corrente alterna, apresenta algumas vantagens tais como:

- Arco mais estável, devido à ausência dos problemas do reescorvamento do arco
- Como a polaridade é constante, torna-se mais fácil regular a transferência de metal através do arco

A corrente alterna também apresenta algumas vantagens, como por exemplo, evita problemas de sopro magnético e pode ser benéfica na soldadura de alguns metais (como é o caso do alumínio) [7].

2.3. Transferência do Metal Fundido

Ao longo dos anos, a transferência do metal fundido tem vindo a ser alvo de estudos. Destes estudos realizados resultam duas teorias, que, até aos dias de hoje, são as mais sustentadas. São elas a **teoria do equilíbrio das forças estáticas** e a **teoria da instabilidade devido à constrição (“pinch effect”)** [10].

Teoria do equilíbrio das forças estáticas

A teoria do equilíbrio das forças estáticas tem em consideração a resultante das forças estáticas que actuam no destacamento da gota. Quando as forças estáticas de destacamento da gota excedem as forças estáticas de retenção, obtém-se o destacamento da gota. [10]

A condição necessária para o destacamento da gota é dada pela seguinte expressão:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_V \quad (2.3.1)$$

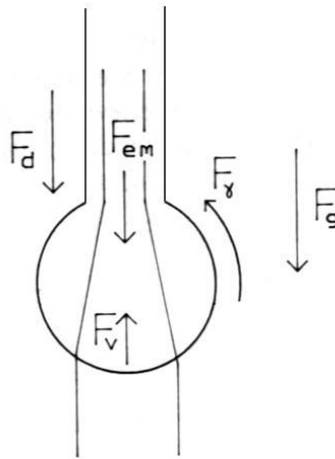


Figura 2.2– Forças que actuam na gota de material de adição fundido

Onde:

$F_{em} \rightarrow$ Força Electromagnética

$F_g \rightarrow$ Força da gravidade

$F_a \rightarrow$ Força de arrastamento pelo plasma

$F_\gamma \rightarrow$ Força resultante da tensão superficial

$F_V \rightarrow$ Força de vaporização

Força da Gravidade

$$F_g = m_{gota}g \quad (2.3.2)$$

Onde:

$m_{gota} \rightarrow$ Massa da gota

$g \rightarrow$ Aceleração da gravidade

Esta é uma força que ajuda ao destacamento da gota, onde a massa da gota e a componente de aceleração vertical gravítica são os dois elementos principais.

Apoia na soldadura ao baixo, mas tem comportamento contrário na soldadura em posição.

Força de Arrastamento pelo Plasma

É dada pela seguinte expressão:

$$F_d = 0,5 \pi V_{gás}^2 \rho_{gás} r_{gota}^2 C \quad (2.3.3)$$

Onde:

$V_{gás}$ → Velocidade/fluxo de gás

$\rho_{gás}$ → Densidade do gás

r_{gota}^2 → Raio da gota

C → Coeficiente de arrastamento

Esta força, é provocada pela acção viscosa de arrasto provocada pelo fluxo de gás de protecção e que ajuda ao destacamento da gota, sendo função da velocidade de deslocação do gás e da dimensão da gota.

Força Electromagnética

$$F_{em} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \left[\frac{r_a^2}{R} \right] \quad (2.3.4)$$

Onde:

μ → Permeabilidade magnética

I → Intensidade de corrente

r_a → Raio da mancha anódica

R → Raio do fio eléctrodo

É a força resultante do campo magnético gerado pela passagem de corrente através do arame. Esta força tanto pode ser positiva como negativa, dependendo do caminho do fluxo de corrente e dos valores de r_a e R . Para intensidades mais altas, esta força tende a dominar as outras forças.

Algumas considerações sobre a força electromagnética:

- Em corrente contínua, polaridade inversa CCPI (eléctrodo ligado ao ânodo), esta força ajuda ao destacamento da gota, aumentando com o aumento da corrente eléctrica.
- Para intensidades acima da corrente de transição, esta força torna-se preponderante, originando, de imediato, o destacamento de qualquer pequena gota que se forme na extremidade do fio do eléctrodo.
- Em corrente contínua, polaridade directa CCPD (eléctrodo ligado ao cátodo), esta força impede o destacamento da gota, assumindo-se para valores elevados de corrente como a principal responsável pela transferência repelida, inviabilizando esta forma de polaridade.

Força Resultante da Tensão Superficial

$$F_\gamma = 2 \pi R \gamma (T) \quad (2.3.5)$$

Onde:

$R \rightarrow$ Raio do fio eléctrodo

$\gamma \rightarrow$ Tensão Superficial

Esta força actua sempre no sentido contrário ao destacamento da gota, evolui em função da dimensão da gota, e da tensão superficial que vai depender do material do fio do eléctrodo e da temperatura à qual se encontra a superfície da gota.

Força de Vaporização

$$F_v = \frac{m_v}{d_v} I J \quad (2.3.6)$$

Onde:

$m_v \rightarrow$ Total de massa vaporizada por segundo e Ampère

$d_v \rightarrow$ Densidade do vapor

$I \rightarrow$ Intensidade de corrente eléctrica

$J \rightarrow$ Densidade de corrente eléctrica

É uma força que actua no sentido contrário ao destacamento da gota, e varia em função do material e dos níveis de corrente.

Teoria da Instabilidade devido à Constrição (“pinch effect”)

Esta teoria partiu da análise de um cilindro líquido de raio R , cilindro esse com dadas concavidades com determinado comprimento. Devido à tensão superficial, estas concavidades, que inicialmente possuíam um comprimento determinado, vão atingir um valor crítico, e o cilindro tende a formar uma fila de esferas.

Ou seja, quando a quantidade de metal líquido for suficiente para se tornar instável e desprender uma determinada quantidade de gotas, ocorre a transferência de metal [10].

2.4. Processo de Soldadura MAG

O processo de soldadura MAG é um processo de soldadura por fusão. A fusão do material de adição e do material de base é obtida através do calor desenvolvido por um arco eléctrico.

Neste processo de soldadura, o material de adição é obtido através da utilização de um consumível do tipo fio sólido contínuo, que é accionado quando se prime um “gatilho” que se encontra na tocha de soldadura.

O tipo de corrente eléctrica utilizada é DC (+)/DCEP, designado de polaridade inversa e corrente alterna, AC. A polaridade directa, raramente é utilizada devido às dificuldades na

transferência do metal fundido do fio sólido para a peça, como se pode verificar na figura 2.3 [7].

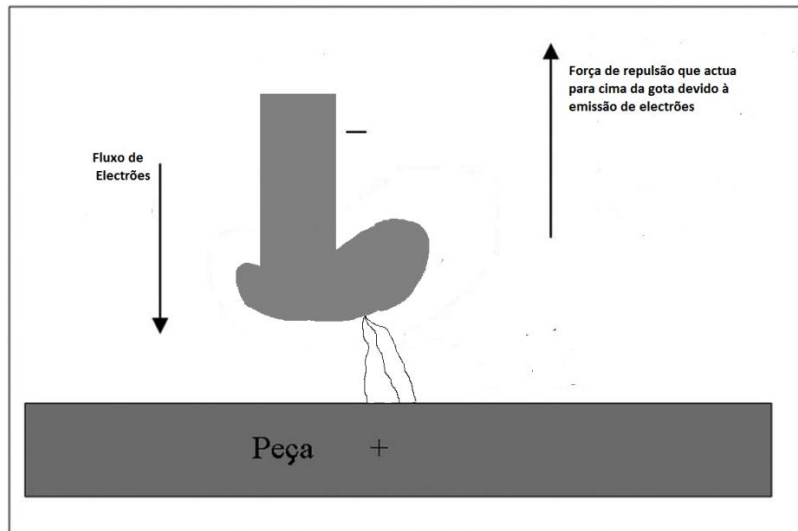


Figura 2.3. Destacamento da gota com polaridade directa DC(-) [11]

As gotas de metal de adição, o banho em fusão, e o cordão de soldadura são protegidos através de uma protecção gasosa. No caso do MAG, tem-se uma protecção activa, com a utilização de gases como o CO_2 ou misturas de gases inertes e activos. Estes gases, além de fazerem a protecção ao material fundido, vão também provocar reacções químicas de oxidação exotérmicas.

O processo MAG é aplicado aos materiais ferrosos [7].

É possível utilizar correntes de soldadura de 50 A até aos 600 A, tensões de soldadura dos 15 V até aos 32 V [12].

Este processo de soldadura ganhou um grande destaque na construção soldada, pois apresenta as seguintes vantagens:

- Solda todos os metais
- Permite um controlo de penetração razoável
- Solda em todas as posições
- Apresenta uma taxa de depósito entre 1,2 a 1,5 Kg/h
- É processo muito fácil de automatizar
- Não origina escória, excepto quando se utiliza o gás de soldadura 100 % CO_2
- Tem uma maior eficiência de eléctrodos
- Baixos níveis de hidrogénio

Parâmetros de Soldadura

O processo de soldadura MAG tem como parâmetros:

- Intensidade de soldadura/velocidade de alimentação de fio
- Tensão de arco eléctrico
- Velocidade de soldadura
- Tipo de fio e seu diâmetro
- Tipo de protecção e seu caudal
- Extensão livre de eléctrodo
- Indutância

2.4.1. Princípio de Funcionamento do Processo MAG

Na figura 2.4 estão representados os componentes principais que fazem parte do equipamento de soldadura MAG, (1) alimentador de fio sólido, (2) bobine de fio sólido, (3) fio sólido, (4) cabos, (5) fonte de energia, (6) peça a soldar, (7) tocha de soldadura e (8) garrafa de gás de protecção.

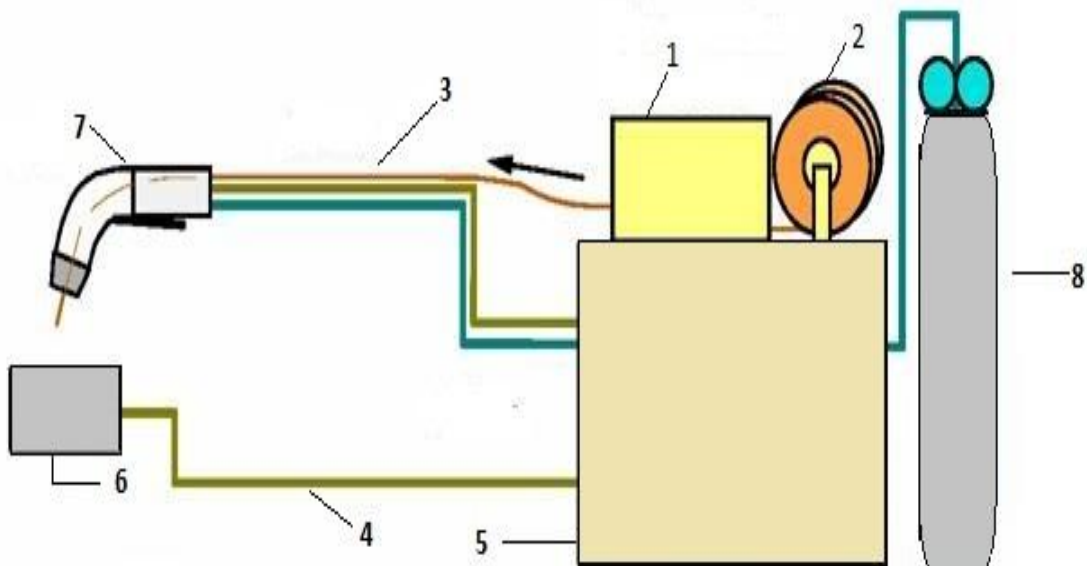


Figura 2.4. Esquema de uma máquina de soldadura MAG[13]

O alimentador de fio sólido tem como função, alimentar o fio sólido consumível através de guias, de rolos alimentadores e rolos de guia, com uma velocidade sempre constante, para evitar-se oscilações durante o processo.

A tocha de soldadura vai direccionar a alimentação do fio sólido consumível, os fluxos de corrente eléctrica e do gás de protecção para o banho de fusão.

Neste processo o fio sólido é, em simultâneo, o material de adição e o condutor do arco eléctrico. Por meio de 2 ou 4 rolos o fio sólido chega à tocha de soldadura, e no seu interior possui um bico tubo de contacto, que é onde se dá a transição de corrente. A extensão livre de eléctrodo é rodeada por um bocal de gás que tem como função direccionar o fluxo de gás até ao banho em fusão.

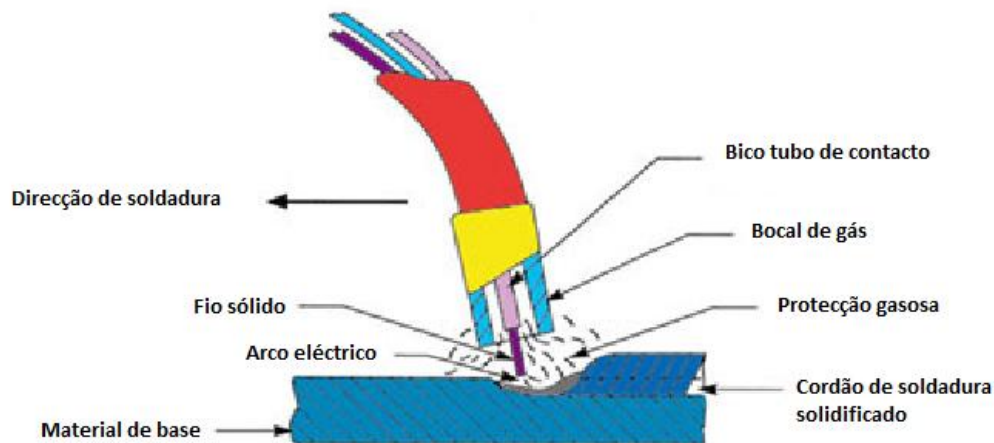


Figura 2.5.Princípio de funcionamento MAG[14]

2.4.2. Fontes de Energia

As fontes de energia para o processo MAG podem possuir dois tipos de curvas características:

- Corrente constante (figura 2.6)

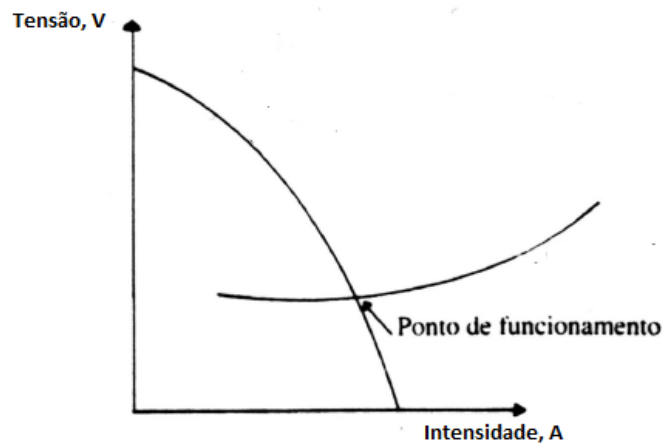


Figura 2.6. Curva característica da fonte de alimentação, intensidade constante

- Tensão constante ou plana (figura 2.7)

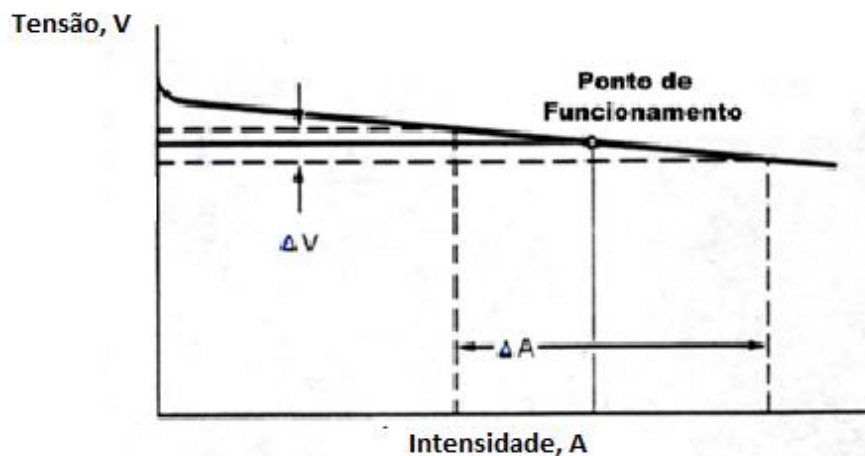


Figura 2.7. Curva característica da fonte de alimentação, tensão constante ou plana

A curva característica de tensão constante (ou plana) é a mais utilizada.

A alimentação de fio é automática, pelo que não é necessário mover a tocha de cima para baixo para estabilizar o arco. Contudo, pode dar-se o caso em que a altura de arco seja alterada (pingo de soldadura), pelo que é necessário possuir um sistema de controlo de estabilidade de arco para precaver estas situações.

O controlo da estabilidade de arco pode ser obtido através de:

- Efeito de Auto-Regulação
- Tensão de Arco

Efeito de Auto-Regulação

É composto por um alimentador de velocidade fixa, e apresenta uma fonte com uma curva característica estática de tensão constante.

Isto é, se o comprimento do arco têm tendência para variar, a intensidade de corrente varia significativamente, provocando assim alterações na taxa de fusão do fio sólido, de forma a compensar a variação do comprimento do arco.

Exemplo- Um aumento do comprimento do arco eléctrico é acompanhado por uma redução da intensidade de corrente, e consequentemente, aumenta a taxa de fusão do fio sólido, para que saia mais fio até que o arco eléctrico volte ao comprimento inicial.

Controlo por Tensão de Arco

Este sistema, possui um alimentador de velocidade “variável”, em que a fonte de energia apresenta uma curva característica estática de intensidade constante. A estabilidade é efectuada através de um dispositivo electrónico, que mede a tensão de arco e a compara com um valor padrão.

2.4.3. Modos de Transferência

Logo desde o início da utilização do processo MAG, se verificaram vários comportamentos de arco, bem como diferentes aspectos de cordão de soldadura, sempre que se variava, a intensidade, a tensão e o gás de protecção utilizado. Foi observado que estes diferentes comportamentos de arco, vão condicionar a qualidade das soldaduras realizadas [7].

Tendo, assim, uma importância tão importante para a soldadura, foi então alvo de estudo e em 1977 o Instituto Internacional de Soldadura (IIW), classificou diferentes modos de transferência [7].

São eles:

- Globular
- Repelida
- Pulverização Axial
- Chuveiro
- Rotacional

- Explosiva
- Curto-circuito
- Guiada por parede de fluxo

Existiam, assim, muitos modos de transferência, e de modo a facilitar a classificação destes modos de transferência, estes foram divididos em dois grupos, transferência em “voo livre” e transferência por curto-circuito.

Alguns anos depois foram realizados alguns estudos, com recurso a técnicas fotográficas de alta velocidade, luz estroboscópia e vídeo, para clarificar ainda mais estes modos de transferência, deixando assim cair por terra alguns destes modos de transferência, pois ocorriam numa gama de parâmetros muito restrita, e era muito difícil estabilizar o arco [7].

Hoje em dia, os modos de transferência mais utilizados em construção soldada no processo MAG são, Curto-Circuito, *Spray* e Globular [10].

Os modos de transferência são influenciados pelo tipo de gás utilizado, tipo de fio sólido, diâmetros do fio sólido, intensidade/velocidade de alimentação e pela tensão/altura de arco [7].

Transferência por Curto-Circuito

O processo de transferência de metal por Curto-Circuito ocorre, quando a velocidade de alimentação de fio sólido excede a taxa de fusão, fazendo assim com que o fio toque no banho de fusão. Este contacto, entre o fio sólido e o banho de fusão vai dar origem a um Curto-Circuito. Como consequência do curto-circuito, a intensidade aumenta e, devido à resistência, dá-se o aquecimento do eléctrodo até à fusão, dando-se assim a transferência do metal. O arco é então restabelecido e a corrente desce rapidamente, e têm-se as condições necessárias para que ocorra novamente o mesmo processo, conforme se representa na figura 2.8

Esta sequência de acontecimentos é repetida com uma frequência que varia de 20 a 200 vezes por segundo [12].

É um modo de transferência típico para baixa tensão e baixa intensidade, em que os fios sólidos normalmente utilizados apresentam um diâmetro entre 0,8-1,2 mm. Como são empregues baixas intensidades de corrente, este modo de transferência é ideal para soldar chapas finas, efectuar passes de raiz, soldadura em posição e quando se pretende minimizar as distorções das peças a soldar [12].

Devido ao comportamento aleatório que apresenta este modo de transferência, este pode resultar na instabilidade do arco eléctrico, podendo assim causar faltas de fusão do material e também gerar muitos salpicos.

Uma das formas de minimizar o problema dos salpicos, é recorrer à indutância na fonte de potência, já que esta vai fazer com que a subida da intensidade (quando se dá o curto-circuito) não seja tão abrupta, diminuindo assim a quantidade de salpicos.

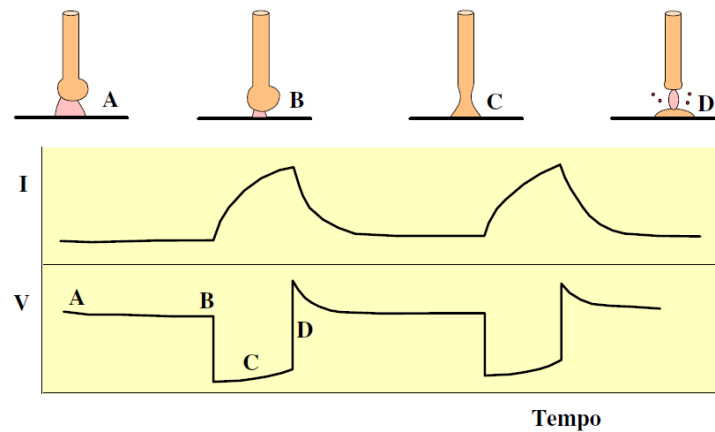


Figura 2.8. Sequência de fenómenos que ocorrem na soldadura MAG pelo modo de transferência por curto-circuito

A força electromagnética é a responsável pelo destacamento da gota. Quando se dá um curto-circuito a intensidade aumenta, o que faz com que a força electromagnética aumente também.

Transferência Globular

Na transferência Globular, a transferência ocorre para valores de intensidade de corrente e tensão de soldadura intermédios, entre o Curto-Circuito e o *Spray*. Uma das formas de se chegar com facilidade a este modo de transferência é ultrapassar os valores máximos recomendados para a soldadura através do modo de transferência por Curto-Circuito [12].

As gotas do metal fundido, apresentam um diâmetro superior ao do fio sólido. A força gravítica tem um papel preponderante no destacamento da gota, pois este só ocorre quando a força gravítica é superior à força gerada pela tensão superficial que actua no sentido contrário ao destacamento da gota [7].

É um modo de transferência em que é muito difícil controlar o banho de fusão, pois o destacamento da gota é aleatório, originando também muitos salpicos.

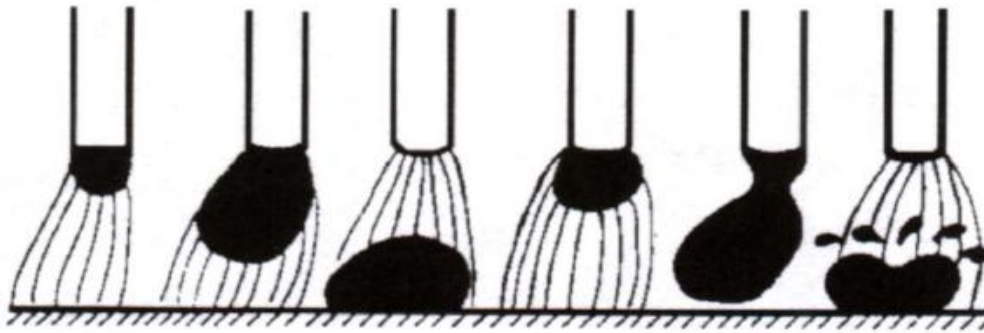


Figura 2.9.Transferência globular

Transferência por *Spray*

Este modo de transferência ocorre quando a intensidade de soldadura ultrapassa um valor limite, chamado de corrente de transição. À medida que nos aproximamos da corrente de transição, o tamanho das gotas diminui, e a frequência com que ocorre a transferência aumenta, até ser atingido o *Spray*, dando origem a gotas com um diâmetro semelhante ao diâmetro do fio sólido [14].

Ocorre para intensidades de soldadura elevadas, resultando assim um elevado banho de fusão, sendo adequado para casos em que sejam necessárias elevadas taxas de depósito e para soldadura ao baixo, sendo limitada para chapa fina e soldadura em posição, pois é mais difícil controlar o banho em fusão.

Este modo é causado por um aumento significativo das forças electromagnéticas, devido ao aumento da intensidade de soldadura.

Outro aspecto a ter em conta neste modo de transferência é a escolha do gás de protecção, misturas ricas em argon são as ideais, pois à medida que aumenta a % de CO₂ mais difícil se torna chegar ao modo de transferência por *Spray*, o que é mesmo impossível para percentagens superiores a 20% de CO₂.

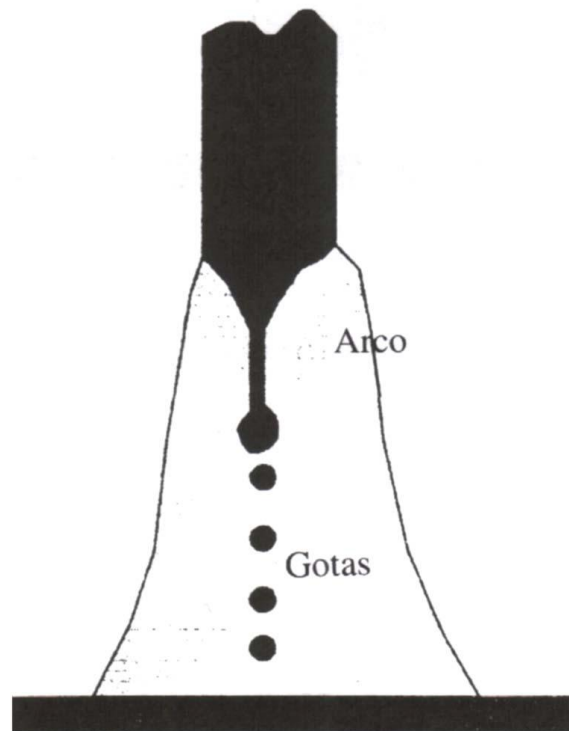


Figura 2.10. Transferência por *Spray*

2.4.4. Gases de Protecção

Os gases de protecção têm como principal função evitar o contacto entre o banho de fusão e a atmosfera envolvente. Esta protecção é de extrema importância para a soldadura, pois a maioria dos metais, à temperatura de fusão, têm tendência em formar óxidos, quando em contacto com a atmosfera.

Para além da protecção que os gases de soldadura proporcionam, eles também têm influência nas características do arco eléctrico, a sua estabilidade, o modo de transferência, a geometria do cordão e as características mecânicas e metalúrgicas do material fundido [15].

A escolha dos gases de soldadura é feita de acordo com o material que vamos soldar [15].

No processo MAG os gases mais utilizados, são o dióxido de carbono, árgon, hélio e oxigénio, mas, na sua maioria, sob a forma de misturas de árgon com dióxido de carbono.

Gases	Energia de Ionização (eV)	Condução Térmica ($\mu\text{W} / \text{cm}.\text{°C}$)
Árgon	15,79	162 (0 °C)
Hélio	24,58	1.484 (0 °C)
Dióxido de Carbono	14,40	162 (25 °C)
Oxigénio	13,16	243 (0 °C)
Azoto	15,51	241 (0 °C)

Figura 2.11. Propriedades dos gases utilizados na soldadura

Árgon

O árgon é um gás inerte que pode ser usado no seu estado puro ou em misturas com outro gás, ou gases, de maneira a obter as características desejadas. O árgon é utilizado no seu estado puro na soldadura de materiais não ferrosos como o alumínio e o titânio. Quando é utilizado para soldadura de materiais ferrosos, o árgon é, normalmente, misturado com outros gases como o dióxido de carbono, oxigénio, hidrogénio e azoto [12].

Apresenta uma boa estabilidade de arco, e um fácil escorvamento de arco eléctrico devido à sua baixa energia de ionização.

Dá origem a um cordão de soldadura com um perfil de penetração em forma de dedo (como se indica na figura 2.12), e este perfil deve-se ao facto de o árgon produzir uma coluna de arco restrita a uma alta densidade de corrente, que vai fazer com que a energia do arco fique concentrada numa pequena área (a zona exterior apresenta uma menor densidade de energia relativamente ao centro do arco).

Em resumo o árgon apresenta as seguintes características:

- Gás de características inertes
- Fácil escorvamento e manutenção da estabilidade de arco
- Eficiente protecção gasosa, pouco sensível às correntes de ar
- Cordão com tendência convexa e penetração em “dedo”

- Gás económico, quando comparado com o Hélio

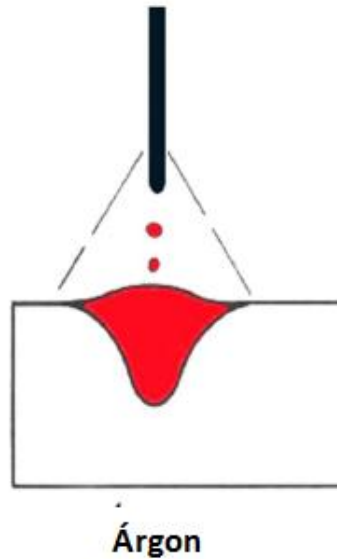
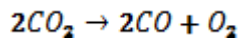


Figura 2.12. Morfologia de cordão recorrendo ao gás de protecção árgon

Dióxido de Carbono

O calor do arco eléctrico vai dissociar o dióxido de carbono em monóxido de carbono e oxigénio livre, o que faz com que este gás não seja inerte [12].



O dióxido de carbono é muito utilizado na soldadura dos aços. Um dos maiores problemas deste gás é que gera uma grande quantidade de salpicos. Não é possível atingir o modo de transferência por *Spray* com este gás, pelo que se fica restrito aos modos Curto-Circuito, e Globular.

Apresenta também um fácil escorvamento e boa manutenção da estabilidade do arco eléctrico, sendo pouco sensível às correntes de ar e originando uma camada superficial de óxidos e escórias.

Em relação à morfologia do cordão de soldadura, este gás apresenta um cordão largo, com boa penetração e uniforme, como se representa na figura 2.13.

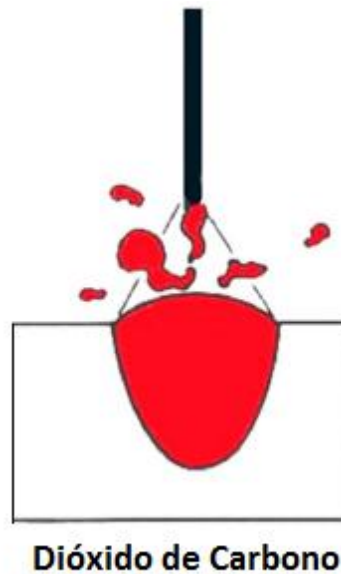


Figura 2.13. Morfologia do cordão recorrendo ao gás de protecção dióxido de carbono

Hélio

O hélio é também um gás inerte, bastante utilizado em aplicações em que seja necessária uma maior quantidade de calor para melhorar a molhabilidade do cordão de soldadura, pois quanto maior for a energia calorífica entregue ao banho de fusão menor a tensão superficial e melhor a molhagem.

Não apresenta um arco eléctrico tão estável comparativamente ao árgon, pois apresenta uma maior condutividade térmica.

Dá origem a um cordão de soldadura largo e com uma penetração uniforme, origina também elevadas entregas térmicas e permite elevadas velocidades de soldadura.

Devido a este gás ser mais dispendioso do que o árgon, ele é mais utilizado em pequenas percentagens em misturas com árgon como gás principal.

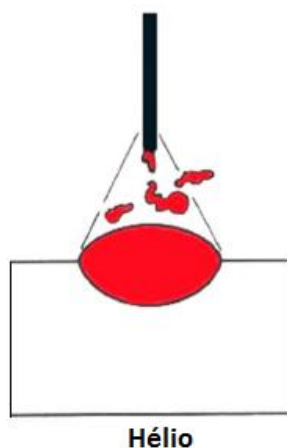


Figura 2.14. Morfologia do cordão recorrendo ao gás de protecção Hélio

Oxigénio

O oxigénio é utilizado em pequenas percentagens como elemento secundário em misturas com o árgon. Esta adição de pequenas percentagens ao árgon vai apresentar melhorias na estabilidade do arco eléctrico, como sejam o aumento da taxa de fusão do fio sólido, o que faz com que a corrente de transição necessária para se obter o modo de transferência por Spray seja mais baixa, e promove também a formação de óxidos sobre o banho de fusão.

É um gás muito económico, apresenta uma morfologia de cordão de soldadura com tendência menos convexa, largo, com uma boa penetração e uniforme.

Azoto

É um gás de características não reactivas, que é utilizado como elemento de adição ao árgon. É bastante utilizado em pequenas percentagens, no máximo até 2% na soldadura dos aços inoxidáveis austeníticos, promovendo assim uma microestrutura austenítica.

Também é muito utilizado como gás de purga.

2.5. Emissão de fumos na Soldadura

Na soldadura MAG, assim como em outros processos de soldadura por fusão, a menos que sejam tomadas as devidas precauções, o soldador está sempre exposto á emissão de fumos o que apresenta potenciais riscos para a saúde.

Os fumos são uma mistura de partículas sólidas e gases tóxicos. Estas partículas sólidas são, na sua maioria óxidos, que se formam quando o metal fundido é vaporizado no arco eléctrico, e que vai condensar-se em contacto com o ambiente envolvente.

Na figura 2.15 é possível verificar elementos que são libertados durante a soldadura, partículas pequenas e grandes identificadas pelo número 3 e 4. O número 1 e 2 representam a gota do metal fundido e banho de fusão respectivamente.

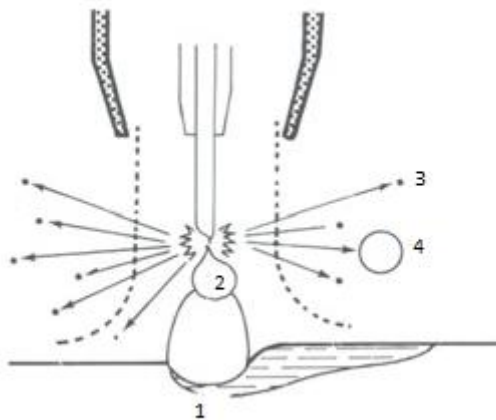


Figura 2.15.Libertação de partículas [16]

Na soldadura pelo processo MAG, o fio sólido (material de adição) é a principal fonte na formação de fumos, em cerca de 90%, e o material de base contribui apenas com 10%. Os salpicos que resultam da instabilidade do arco eléctrico são também responsáveis pela formação de fumos [17].

A composição do fumo depende da volatilização das substâncias presentes no fio sólido (consumível), pelo que a composição dos fumos formados durante a fase de soldadura corresponde, aproximadamente, à composição do fio consumível utilizado.

Um aspecto muito importante neste tema, é a estabilidade do arco eléctrico, já que um arco eléctrico estável dá origem a uma menor quantidade de fumos.

Existem vários factores que contribuem para a formação de fumos, sendo mais importantes a dimensão da gota e a sua temperatura. Quanto maior for essa temperatura, maior será a vaporização do metal. Na figura 2.16 é possível verificar qual a influência do diâmetro da gota na taxa de formação de fumos, também se sabe que é possível relacionar o diâmetro de gota, com os vários modos de transferência existentes, sendo o modo de transferência por *spray* aquele que apresenta valores de diâmetro de gota inferiores [18].

Verifica-se também na figura 2.16 que à medida que diminui o diâmetro da gota diminui também a taxa de formação de fumos.

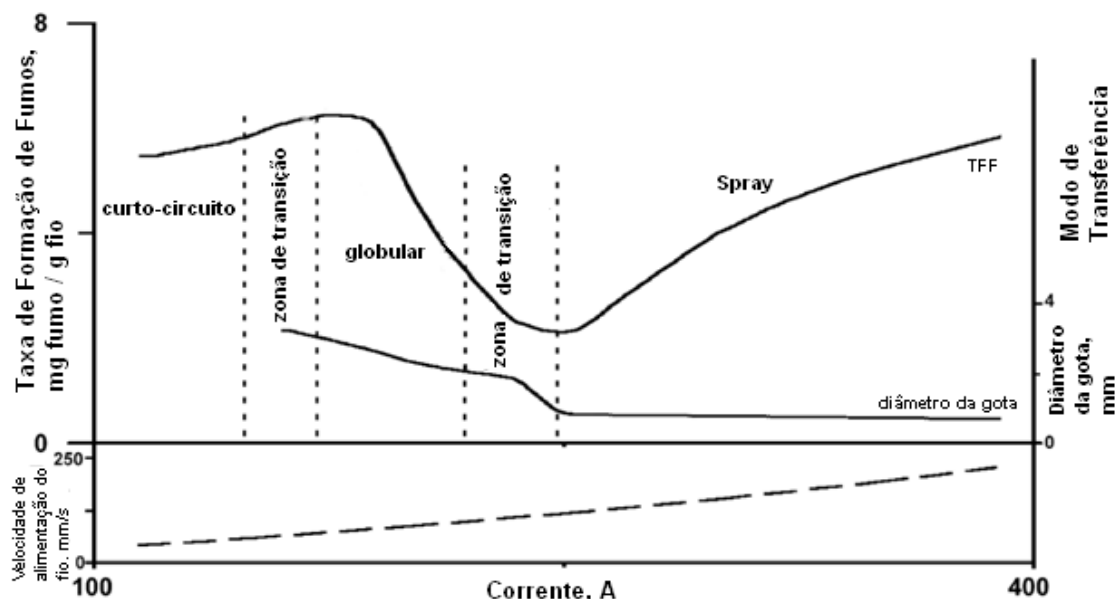


Figura 2.16 Representação da variação da taxa de formação de fumos com uma mistura gasosa de Ar+ 2%Co₂, na soldadura de um aço ao carbono [18]

Como se pode verificar na figura 2.17, à medida que os valores dos parâmetros de soldadura aumentam (intensidade, tensão), aumenta também a taxa de formação de fumos. Mas há aqui uma pequena contradição com o que descreve a figura 2.16, pois o tamanho da gota também tem influência na taxa de formação de fumos, e, para o modo de transferência por *spray* o tamanho da gota é inferior, sendo da ordem de grandeza do diâmetro do fio sólido. Contudo neste modo de transferência estão a ser utilizadas intensidades e tensões de soldadura elevadas, pelo que a taxa de fusão do fio vai ser muito maior e, como consequência, vão ser gerados mais fumos, o que, em determinado espaço de tempo, projecta mais gotas para o banho em fusão comparativamente como outros modos de transferência.

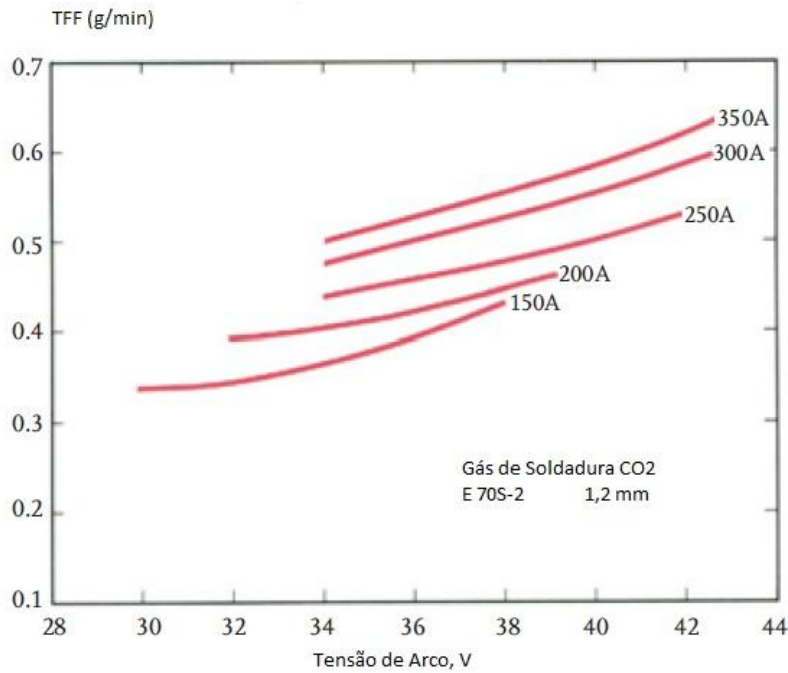


Figura 2.17. Representação da taxa de formação de fumos (TFF) Em função da Tensão e da Intensidade de Soldadura [16]

Os gases de protecção utilizados na soldadura, também contribuem para a formação de fumos. O aumento das percentagens de dióxido de carbono ou do oxigénio geralmente aumentam a taxa de formação de fumos (conforme se indica na figura 2.18).

A quantidade de hélio presente na mistura gasosa também vai ter impacto na taxa de formação de fumos, como se pode ver na figura 2.18.

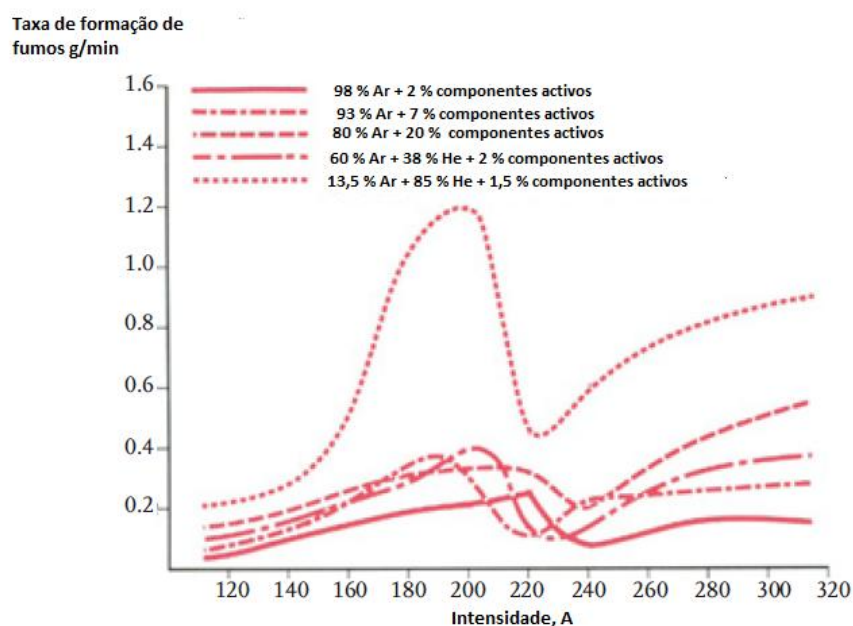


Figura 2.18. Influência das misturas gasosas na taxa de formação de fumos [16]

2.6.Nanopartículas

A soldadura é o principal processo industrial utilizado para unir os metais. Do processo pode resultar a libertação de fumos, dos quais podem colocar em risco a saúde dos operadores [4].

Na tabela 2.1 é possível verificar alguns dos constituintes que estão presentes nos fumos libertados durante a soldadura e quais as causas para a saúde que apresentam estes elementos.

Tabela 2.1. Efeitos na saúde dos elementos libertados através de fumos de soldadura

Elementos	Efeitos na saúde
Crómio (Cr)	Causa irritação das membranas mucosas, febre de fumos metálicos, afecta as vias respiratórias e os pulmões. Aumenta também o risco de se contrair cancro nos pulmões.
Cobre (Cu)	É proveniente do material de base e de adição, pode provocar a febre de fumos metálicos.
Ferro (Fe)	Na soldadura dos metais ferrosos, os fumos de soldadura libertam óxidos de ferro. A exposição prolongada ao óxido de ferro pode conduzir a uma doença chamada de siderose (dificuldades respiratórias, pneumonias e bronquites)
Níquel (Ni)	Pode causar febre de fumos metálicos, é também um elemento cancerígeno.
Manganês (Mn)	Este elemento pode causar, irritação da mucosa, tremores, rigidez nos músculos, fraqueza e perturbações das capacidades mentais. O sistema nervoso e respiratório pode também ser afectado.

Os fumos libertados podem conter partículas ultrafinas, de escala nanométrica.

A influência que as nanopartículas apresentam para a saúde, têm levantado algumas preocupações. O estudo sobre este tema está ainda numa fase inicial, estando dependente da inovação tecnológica [4].

Vários estudos indicam que uma vez no corpo, os nano-objects podem-se deslocar para órgãos ou tecidos distantes da zona de entrada. Como possuem longa duração são biopersistentes e bioacumulativos no organismo, em especial órgãos como os pulmões, o cérebro e o fígado. Esta deslocação de nanopartículas no organismo humano poderá desempenhar um papel importante no desenvolvimento de determinadas patologias cardiovasculares, respiratórias e do sistema nervoso central [19].

Os efeitos para a saúde estão dependentes das regiões de deposição.

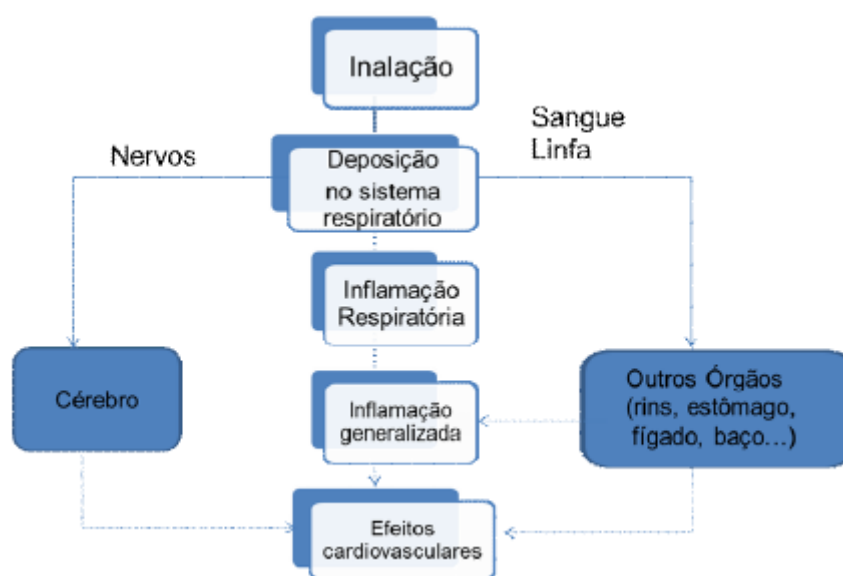


Figura 2.19.Efeitos potenciais sobre o organismo [19]

É conhecido que a deposição pulmonar é o meio mais eficiente para partículas que se encontram em suspensão entrarem no corpo humano, e produzirem risco para a saúde.

As propriedades mais importantes das nanopartículas que contribuem para os efeitos adversos são: solubilidade, morfologia das partículas, tamanho das partículas, composição e a área superficial, sendo a última a mais importante na análise da toxicidade das nanopartículas. O potencial de risco é directamente proporcional à área superficial [4].

Em 1996 a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) desenvolveu um modelo de deposição pulmonar para aerossóis. Para este modelo é necessário considerar vários

parâmetros: taxa de respiração, o volume do pulmão, a actividade respiratória nariz/boca. As curvas obtidas para este modelo variam de acordo com os parâmetros anteriormente referidos.

A *American Conference of Government Industrial Hygienists* (ACGIH) desenvolveu os parâmetros para um trabalhador de referência de modo a ser possível obter as curvas de deposição [4].

1) Parâmetros fisiológicos

Tipo de trabalhador: homem adulto

Capacidade funcional residual: 2200 cm^3

Espaço morto extra-torácico: 50 cm^3

Espaço morto bronquial: 49 cm^3

Altura: 175 cm

Diâmetro da traqueia: 1,65 cm

Diâmetro do primeiro brônquio: 0,165 cm

2) Parâmetros relacionados com a actividade

Nível de actividade: exercício leve

Tipo de actividade: respiração apenas pelo nariz

Taxa de ventilação: $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$

Frequência de respiração: 15 inalações por minuto

Volume de inalação: 1450 cm^3

Fracção inalada através do nariz: 1,0

3) Parâmetros do aerossol

Diâmetro médio aerodinâmico: $0,001 \mu\text{m} - 0,5 \mu\text{m}$

Desvio padrão geométrico: 1,0

Densidade: $1,0 \text{ g/cm}^3$

Factor de forma: 1,0

Na figura 2.20 é possível verificar as curvas de deposição para as regiões traqueobrônquial e alveolar do pulmão, baseados nestes parâmetros e no modelo ICRP.

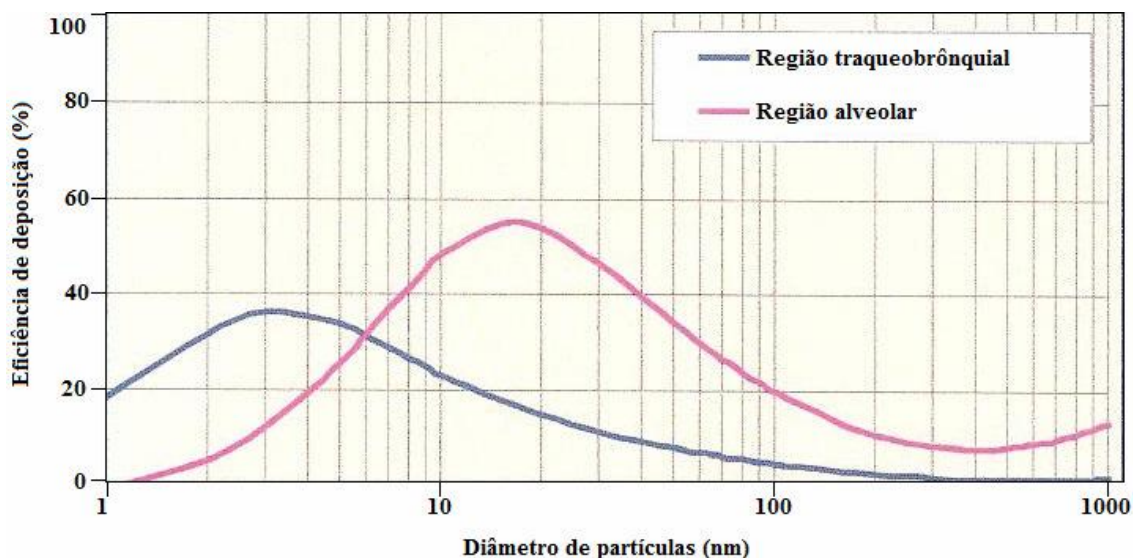


Figura 2.20. Curvas de deposição na zona traqueobrônquial e alveolar do pulmão [5]

Medidas de prevenção

Como, a informação sobre os riscos para a saúde que as nanopartículas apresentam é ainda muito limitada é importante adoptarem-se medidas que permitam minimizar a exposição dos trabalhadores.

Uma das formas de minimizar o risco é a utilização de sistemas de ventilação, adopção de boas práticas de trabalho que evitem a dispersão de partículas, protecção individual, tentar substituir o produto por outro menos perigoso (em soldadura evitar utilizar o eléctrodo revestido celulósico, por exemplo) e as operações de limpeza devem ser efectuadas por aspiração com filtros adequados ao tamanho das partículas presentes ou por meios líquidos [19].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1.Objectivos a Cumprir

Este trabalho tem como objectivos, procurar entender qual a influência dos modos de transferência e dos gases de protecção, na emissão de nanopartículas durante a execução de soldaduras realizadas segundo o processo de soldadura MAG. E, caso seja possível, tentar encontrar algumas formas de melhoria no que respeita à emissão de nanopartículas.

Neste capítulo vão ser mencionados os equipamentos e materiais utilizados durante a experimentação, assim como os procedimentos adoptados para atingir os objectivos pretendidos.

3.2. Materiais Utilizados

3.2.1. Materiais de Base

Para este trabalho, foram utilizados dois materiais muito usuais na indústria de construção soldada, o aço ao carbono e aço inoxidável austenítico.

Aço ao carbono

As chapas de material de base de aço ao carbono utilizadas, de acordo com a norma EN 10025 designam-se por S235 JR. É conhecido por ser um aço estrutural, bastante utilizado no sector da construção, obras públicas e construção mecânica.

A composição química deste aço é a que se indica na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Composição química do material base (Aço ao Carbono)

Composição	C (% máx)	Si (% máx)	Mn (% máx)	P(%)	S(máx)
S235 JR	0,017	-	1,40	0,035	0.035

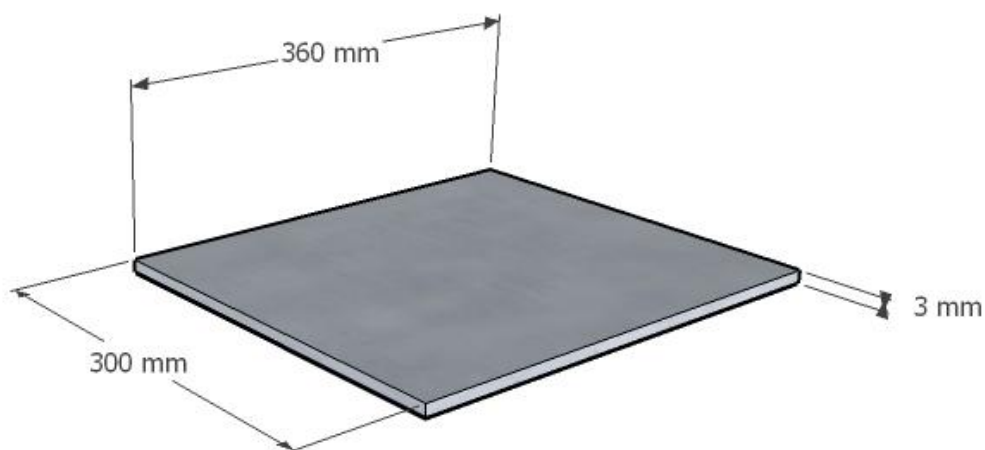


Figura 3.1. Dimensões da chapa de aço ao carbono utilizada

Aço Inoxidável Austenítico

O aço inoxidável escolhido para este trabalho, segundo o código ASME, designa-se por um AISI 304. É um aço inoxidável austenítico muito utilizado na indústria química e alimentar, pois este material apresenta excelentes propriedades em termos de resistência à corrosão.

A composição química deste material está indicada na tabela 3.2.

Tabela 3.2.Composição química AISI 304

Composição	C (% máx)	Mn (% máx)	P (%máx)	S (% máx)	Si (%máx)	Ni (%)	Cr (%)	N (%máx)
AISI 304	0,08	2,0	0,045	0,030	0,75	8,0 - 10,5	18 - 20,0	0,10

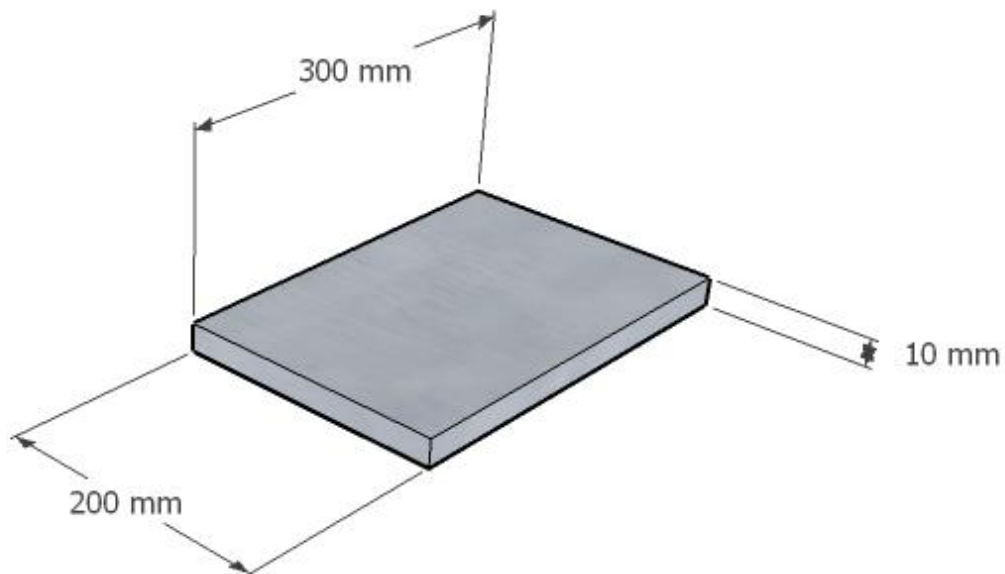


Figura 3.2.Dimensões da chapa de aço inoxidável utilizada

3.2.2. Material de adição

O material de adição utilizado para a deposição de cordões de soldadura na chapa de aço ao carbono, foi um fio sólido designado por AWS 5.18 ER70S-6 de acordo com o ASME, com um diâmetro de 1mm.

Este consumível foi desenvolvido, com a finalidade de proporcionar soldaduras de alta qualidade.

A composição química do material de adição está indicada na tabela 3.3.

Tabela 3.3. Composição química do fio sólido ER70S-6

Composição	C (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)	S (%)
AWS 5.18 ER70S-6	0,06 - 0,15	0,8 - 1,15	0,15 máx	0,15 máx	0,15 máx	0,50 máx	0,35 máx

A escolha do material de adição utilizado para a deposição de cordões de soldadura nas chapas de aço inoxidável austenítico, recaiu no fio sólido com a designação, AWS ER316 LSi de acordo com o código ASME, com um diâmetro de 0,8 mm.

A Tabela 3.4 indica a composição química do material de adição.

Tabela 3.4. Composição química do fio sólido ER316 LSi

Composição	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
AWS A5.9 ER316 LSi	0,03 máx	18 - 20	11 - 14	2,0 - 3,0	1,0 - 2,5	0,65 - 1,00	0,03 máx	0,03 máx	0,75 máx

3.2.3. Gases de Soldadura

Foram escolhidas, no total, cinco misturas gasosas e um gás composto por 100% de dióxido de carbono, para a deposição de cordões de soldadura nas chapas disponíveis.

A principal razão que levou à escolha destas misturas, foi a grande utilização das mesmas na indústria.

As misturas gasosas são as seguintes:

- Arcal 21
- Atal
- Dióxido de Carbono
- Arcal 12
- Arcal 121
- Arcal 129

As três primeiras foram utilizadas na deposição de cordões de soldadura nas chapas de aço ao carbono, e as três últimas nas chapas de aço inoxidável austenítico.

Tabela 3.5. Descrição dos gases utilizados na soldadura das chapas de aço ao carbono

Arcal 21	<ul style="list-style-type: none"> • Esta mistura é composta por 90% de árgon e 10% de dióxido de carbono. É indicada para soldadura de aços ao carbono, e foi desenvolvida para preencher os requisitos mais exigentes de qualidade em processos de soldadura por MAG. • É possível aplicar em todas as posições de soldadura, pode ser aplicada em soldadura manual, automática e robotizada. Apresenta um arco estável e macio, boa molhagem e baixas emissões de fumos, mesmo em transferência globular.
Atal	<ul style="list-style-type: none"> • É uma mistura composta por 82% de árgon com 18% de dióxido de carbono, destinada à soldadura de aços ao carbono. • Com esta mistura é possível utilizar todos os modos de transferência. • É aplicada para todas as posições de soldadura e pode ser aplicada em soldadura manual ou automatizada. • O seu teor de dióxido de carbono permite-lhe obter boas penetrações
Dióxido de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Esta mistura é bastante utilizada em aços não ligados e aços fracamente ligados. • Este gás apresenta uma elevada emissão de fumos e de projecção de metal fundido (salpicos).

Tabela 3.6. Descrição dos gases utilizados na soldadura das chapas de aço inoxidável austenítico

Arcal 12	<ul style="list-style-type: none">• Esta mistura gasosa é composta por 95% árgon e 5% dióxido de carbono.• Apresenta um arco estável e macio, baixo nível de projecções, boa molhagem e bom aspecto superficial do cordão de soldadura.• Sendo uma mistura com uma pequena percentagem de dióxido de carbono, apresenta uma baixa taxa de emissão de fumos.
Arcal 121	<ul style="list-style-type: none">• É uma mistura gasosa composta por 81% árgon, 18% hélio e 1% de dióxido de carbono.• Esta mistura gasosa distingue-se por apresentar emissões reduzidas de fumos e baixo nível de projecções, excelente molhagem e penetração.
Arcal 129	<ul style="list-style-type: none">• Esta mistura gasosa é composta por 91% árgon, 5% hélio, 2% dióxido de carbono e 2% de azoto.• O controlo rigoroso do teor de azoto, assegura excelentes propriedades de soldadura, devido ao seu teor específico de azoto, origina soldaduras com melhores propriedades mecânicas, quando utilizado na soldadura de aços inoxidáveis austeníticos.

3.3.Realização das Soldaduras

3.3.1. Equipamento utilizado

Maquina de soldar ProMig 501 da Kemppi

O equipamento utilizado para este trabalho foi uma máquina de soldadura ProMig 501 da Kemppi, juntamente com uma fonte de alimentação Pro3200 Evolution também da mesma marca.



Figura 3.3. Máquina de soldar ProMig 501 Kemppi

Como se verifica na figura 3.4, no painel de funções do equipamento é possível escolher o processo de soldadura, e entre essas escolhas seleccionar os processos SER, TIG e MIG/MAG.

Para soldadura MIG/MAG, existem três opções para soldar: é possível utilizar o modo convencional, sinérgico ou pulsado. Possui também uma funcionalidade bastante interessante para trabalhos de laboratório que é o WELDDATA, que nos permite visualizar quais os parâmetros de soldadura (intensidade, tensão) que foram utilizadas durante a soldadura, tendo o sistema uma memória que reinicia novamente assim que se prime o gatilho da tocha de soldadura.



Figura 3.4. Painel da máquina de soldadura

Em soldadura convencional, escolheram-se os parâmetros de soldadura através da velocidade de alimentação de fio. Em MIG/MAG sinérgico os parâmetros são otimizados de acordo com o material a soldar e do diâmetro do fio sólido utilizado. A tensão de soldadura é ajustada automaticamente pelo equipamento de acordo com a altura de arco.

A fonte de alimentação Pro3200 Evolution é baseada na tecnologia de inversor (inverter), tecnologia que, ao longo do tempo tem ganho espaço no mundo da soldadura, pois apresenta as seguintes vantagens:

- Características dinâmicas muito superiores à dos equipamentos convencionais, o que lhe permite reagirem mais rápido às diferentes situações do arco eléctrico
- Facilidade na regulação de parâmetros de soldadura
- Capacidade de comutar a característica externa estática, possibilitando a sua utilização em vários processos de soldadura
- Capacidade de funcionar com correntes pulsadas e em modo sinérgico

Mesa de soldadura

A mesa de soldadura utilizada neste trabalho, foi desenvolvida no DEMI da FCT UNL no ano de 2012 [5].

Esta é composta por uma estrutura metálica de tubos quadrados como perfil. Numa das partes superiores da estrutura metálica, existe uma guia linear com uma correia. O movimento da correia é accionado por um motor passo a passo *Astrosyn MY23 HS1-5* [5].

Para proteger a guia linear dos salpicos, a mesa possui uma manta contrafogo.

Através de alterações efectuadas na máquina de soldadura, o accionamento da tocha é efectuado por computador. O circuito eléctrico é fechado por um relé eléctrico, que é controlado através do computador, accionando assim a tocha através deste comando.

Todo o controlo da mesa de soldadura é efectuado pelo *Labview*, com o auxílio de controladores e módulos electrónicos.



Figura 3.5.Mesa de soldadura desenvolvida no DEMI, FCT UNL [5]

3.3.2. Experimentação de Soldadura

Foram realizados cordões de soldadura, nos materiais de base escolhidos para o estudo em questão.

Os parâmetros foram definidos de maneira, a que fosse possível obter os três modos de transferência (curto-circuito, globular e *spray*) para cada composição de gás utilizada.

Para a deposição dos cordões de soldadura na chapa de aço ao carbono, recorreu-se ao auxílio da mesa de soldadura, já para o aço inoxidável austenítico a deposição de cordões foi efectuada através de soldadura manual.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT UNL. Todos os ensaios de soldadura foram realizados, com o sistema de extracção de fumos ligado apresentado na figura 3.6. De registar que, por vezes, encontravam-se a decorrer, no mesmo laboratório, outros trabalhos paralelos à soldadura.



Figura 3.6.Local onde foram efectuados os trabalhos de soldadura e sistema de extracção de fumos

3.3.3. Parâmetros Operatórios de Soldadura

Para cada composição gasosa, foram efectuados três conjuntos de ensaios, de modo a obter-se os modos de transferência pretendidos.

Foram escolhidas várias velocidades de alimentação de fio para os vários ensaios, e em função da velocidade de alimentação de fio seleccionada a tensão foi ajustada automaticamente pela fonte. Procurou-se escolher velocidades de alimentação de fio semelhantes para cada

mistura gasosa, para se poderem estudar as emissões em função dos gases de soldadura utilizados.

O fluxo do gás e o comprimento do cordão foram fixados, em um débito de gás de 15 l/min e um comprimento de cordão de 210 mm.

A tabela 3.6 indica os parâmetros utilizados para os ensaios, no que respeita ao material de base aço ao carbono (S235 JR), recorrendo a um fio sólido ER 70S-6 com diâmetro de 1 mm.

Tabela 3.6. Parâmetros de soldadura utilizados no Aço ao Carbono.

Arcal 21			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	4,0	6,3	11,2
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Atal			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	4,0	6,3	(1)
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
100 % CO ₂			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,5	(1)
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	-

A tabela 3.7 indica os parâmetros de soldadura utilizados na deposição dos cordões sobre o material de base aço inoxidável austenítico (AISI 304) utilizando um fio sólido ER 316 LSi com diâmetro de 0,8 mm.

Tabela 3.7. Parâmetros de soldadura utilizados no Aço Inoxidável Austenítico

Arcal 12			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,0	9,0
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Arcal 121			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	5,0	7,0	9,0
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Arcal 129			
Ensaio	1	2	3
Velocidade de alimentação de fio (m/min)	6,0	7,0	9,8
Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>

Para cada ensaio, foi sempre realizada uma repetição (réplica) por forma a verificar se os dados obtidos eram consistentes.

Nota: (1) Não foi possível atingir o modo de transferência por *spray*, dado que devido à percentagem elevada de dióxido de carbono presente na mistura gasosa, tornou-se muito difícil chegar a este modo de transferência, o que é mesmo impossível a partir de mais do que 15 % de dióxido de carbono [13].

O tempo de execução da soldadura, foi medido com recurso a um cronómetro, registando-se, assim, os valores obtidos.

3.4. Medição da área superficial de nanopartículas

3.4.1. Equipamento utilizado

O equipamento utilizado na avaliação da exposição de nanopartículas durante a fase de soldadura, foi um medidor NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor) TSI Modelo 3550.



Figura 3.7. NSAM, Modelo 3550 da TSI [20]

Este equipamento mede a área superficial de nanopartículas depositadas no pulmão humano, expressa em micrómetros quadrados por centímetro cúbico ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$). Este aparelho permite fazer esta medição em duas zonas diferentes do aparelho respiratório, na região traqueobrônquial (TB), ou alveolar (a) [20].

O funcionamento deste aparelho baseia-se na difusão de cargas electrostáticas nas partículas da amostra, seguindo-se uma detecção das partículas carregadas através de um electrómetro.

Com o auxílio de uma bomba, uma amostra das partículas é arrastada para o equipamento através de um ciclone que vai reter as partículas com dimensões superiores a $1\mu\text{m}$. Após esta fase o fluxo é dividido em dois, um dos fluxos com um caudal de 1 l/min que passa por um filtro de carbono, um filtro HEPA e por um ionizador, que numa câmara de mistura vai introduzir iões positivos nas partículas presentes no fluxo de ar. O restante fluxo, com um caudal de 1,5 l/min, passa directamente para a câmara de mistura, onde se mistura com o fluxo ionizado, e o fluxo de partículas é carregado por difusão. Através de um sistema de aprisionamento de iões, os iões em excesso presentes no fluxo são removidos. Por fim, o fluxo de partículas carregadas move-se para o electrómetro onde vai ser medida a carga, através de um amplificador muito sensível [4].

A carga medida pelo electrómetro é directamente proporcional à área de superfície das partículas que passam pelo electrómetro. Assim que é feito o processamento da informação, são obtidos os valores apresentados em área de superfície por volume de pulmão. Os valores são obtidos por um computador, através de um *software* fornecido pela TSI.

A tensão do sistema de aprisionamento de iões pode ser alterada, para o modo traqueobrônquial ou para o modo alveolar.

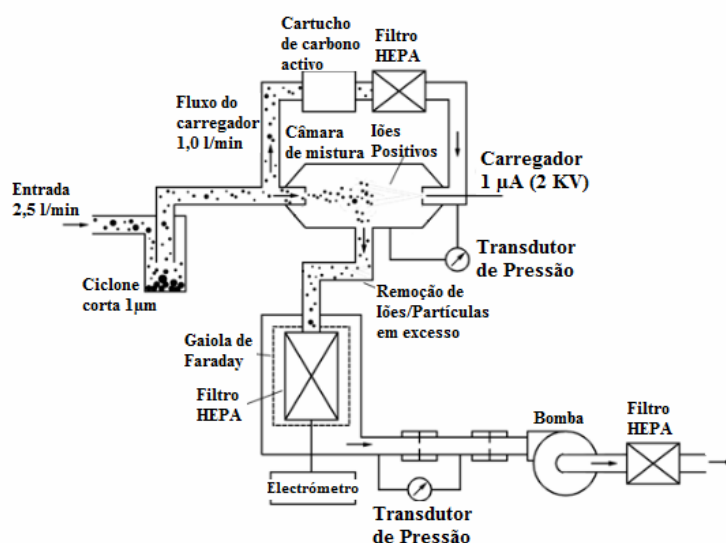


Figura 3.8. Esquema de funcionamento do NSAM [5]

3.4.2. Experimentação da recolha de nanopartículas para medição da área superficial

Com o recurso ao aparelho NSAM (Nanoparticle Surface Area Monitor), directamente ligado ao sistema de aquisição de dados, foi possível obter as áreas de superfície das nanopartículas com capacidade para se depositarem nos pulmões. O aparelho, foi colocado no modo (a), ou seja, o modo que avalia a capacidade das nanopartículas se depositarem na zona alveolar.

Através do *software* fornecido pela TSI, fez-se a calibração do aparelho e verificou-se se não havia nenhum erro. Após esta verificação, se não for detectado nenhum erro, o aparelho está pronto para funcionar correctamente.

Foram definidas medições de 12 em 12 segundos, de modo a evitar possíveis saturações no aparelho.

À medida que eram efectuados os cordões de soldadura, o NSAM efectuava as medições, sendo depois registadas e gravadas através do sistema de aquisição de dados.

Entre soldaduras, esperou-se um determinado tempo, até que o aparelho atingisse a linha de base, de maneira a não influenciar os resultados dos ensaios seguintes.

Para os ensaios de medição, de nanopartículas libertadas durante a soldadura do aço ao carbono, o ponto de recolha estava localizado na tocha de soldadura, como indica a figura 3.9.

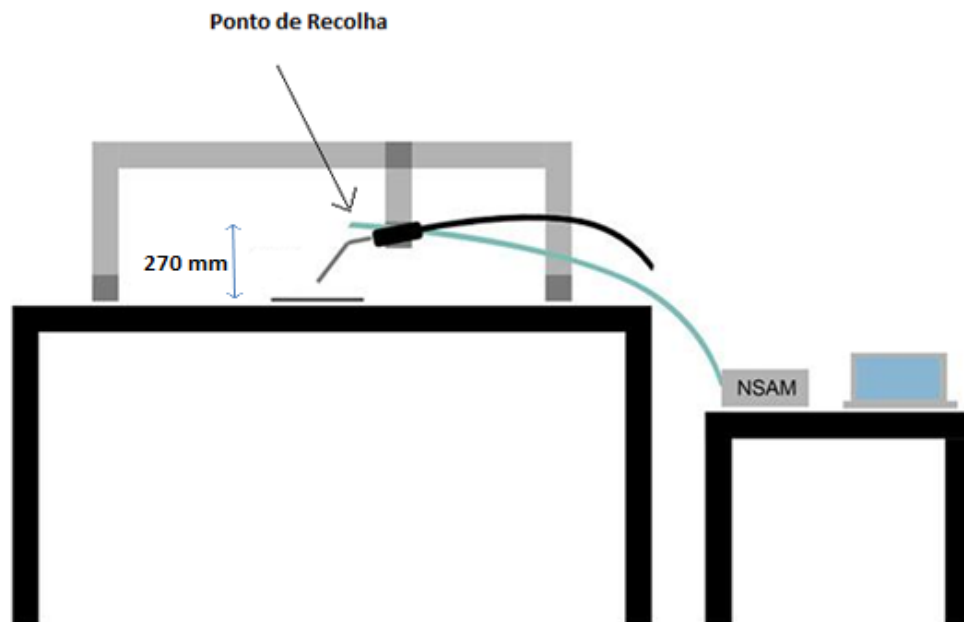


Figura 3.9.Esquema do ponto de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas, na tocha de soldadura

Em relação aos cordões de soldadura depositados nas chapas de aço inoxidável austenítico, o ponto de recolha estava localizado na máscara do operador, avaliando-se, assim, o impacto relativamente à emissão de nanopartículas a que o soldador está exposto. Pode observar-se este esquema na figura 3.10.

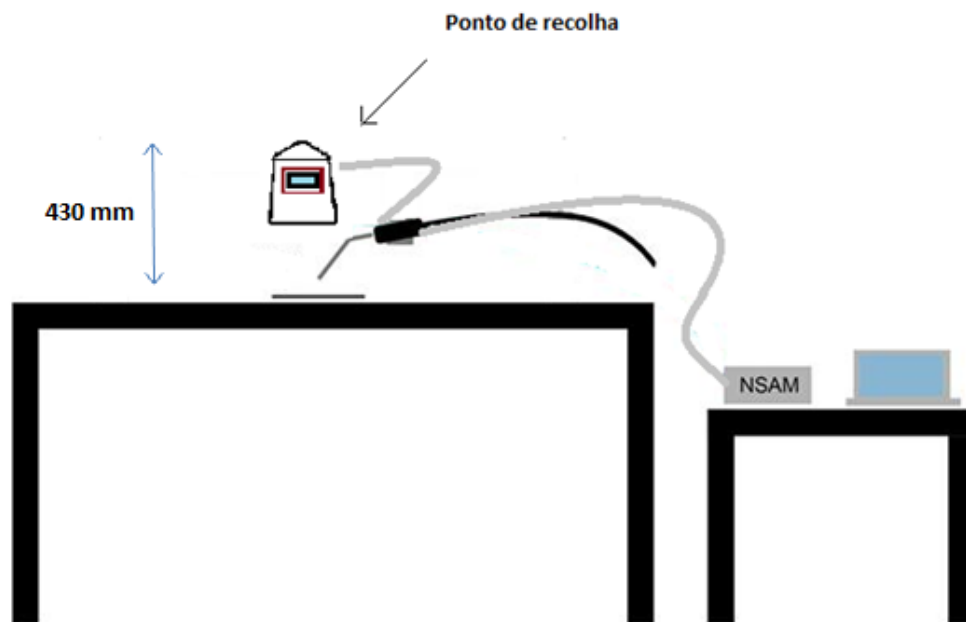


Figura 3.10 Esquema do ponto de recolha para o monitor de área de superfície de nanopartículas, na máscara de soldadura.

3.5.Recolha de nanopartículas

3.5.1. Equipamento utilizado

O equipamento NAS modelo 3089 da TSI permite fazer a recolha de amostras de nanopartículas em suspensão, que, mais tarde, podem ser analisadas.



Figura 3.11 NAS modelo 3089 TSI [21]

Este equipamento é um precipitador electrostático construído de maneira a conseguir capturar as partículas que se encontram em suspensão no ar. Permite capturar partículas, em suspensão, com dimensões entre 2 a 10 nm.

O meio de recolha são grelhas de cobre, para que mais tarde seja possível efectuar a análise das partículas capturadas com recurso à microscopia electrónica de transmissão (TEM).

Este aparelho possui uma bomba localizada no seu interior, cuja função é recolher as partículas em suspensão no ar. As partículas recolhidas são atraídas através de um eléctrodo para o local onde foi colocada uma grelha. O ar que é aspirado é, de seguida, bombeado para o exterior [21].

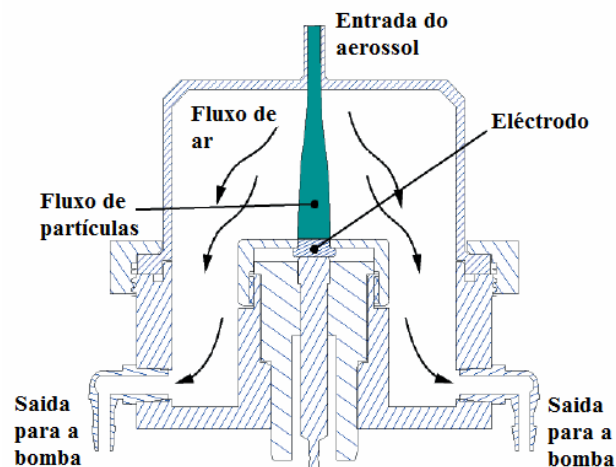


Figura 3.12. Princípio de funcionamento do NAS [5]

3.5.2. Experimentação para a recolha de nanopartículas

O equipamento de recolha de partículas NAS, foi colocado a uma distância fixa, próxima da zona de soldadura, como se pode indicar na figura 3.13.

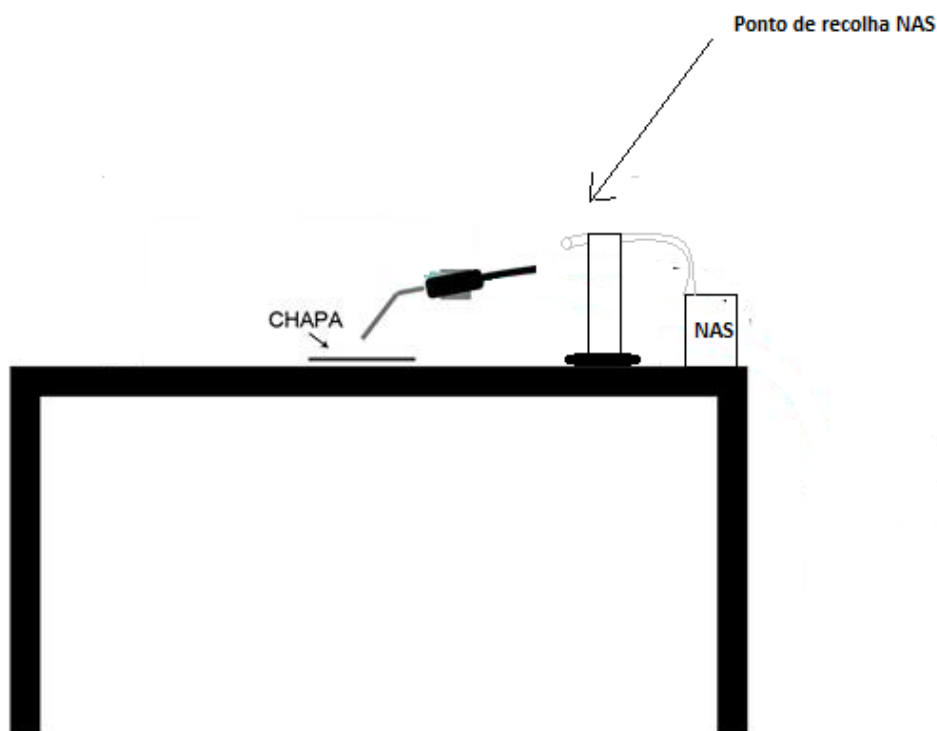


Figura 3.13. Esquema da recolha de partículas libertadas

Foram utilizados sempre os mesmos parâmetros para todos os ensaios: uma tensão de 5,5 V e um fluxo de 2 l/min. À medida que se mudou de mistura gasosa, mudou-se também a grelha de cobre, para se poder analisar a influência da mistura gasosa na composição e na morfologia das partículas libertadas.

3.6. Análise por microscopia electrónica de transmissão

A análise das amostras obtidas através das grelhas de cobre, foi realizada com o auxílio de um microscópio electrónico de transmissão (TEM) da marca Hitachi, Modelo H-8100 II, disponível no IST-Microlab, Electron Microscopy Laboratory (ICEM/IST).

É um microscópio electrónico de 200 kV, constituído por um canhão de electrões por emissão térmica através de um filamento de LaB_6 (este filamento fornece uma maior densidade de corrente, um brilho de 5 a 10 vezes superior e uma vida útil superior, quando comparado com o Tungsténio). Está também equipado com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de Raios-X (EDS), com detector de elementos leves, e possui também um sistema de aquisição digital de imagem através de uma câmara [22].

Na figura 3.14 pode observar-se o microscópio electrónico de transmissão utilizado neste trabalho.



Figura 3.14. Microscópio Electrónico de Transmissão Hitachi H-8100 II

3.7. Conclusão

Seguindo o procedimento experimental atrás referido, foi possível recolher e analisar as partículas emitidas durante a soldadura pelo processo MAG.

Deste modo, foi ainda possível relacionar a emissão de partículas com os modos de transferência e com as misturas gasosas utilizadas.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1.Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na experimentação realizada.

Inicialmente, apresentam-se os resultados referentes aos cordões de soldadura depositados, e, em seguida as áreas superficiais por volume pulmonar, das nanopartículas que se libertam durante o processo de soldadura MAG, e se procuram relacionar com os modos de transferência e as misturas gasosas utilizadas nos ensaios.

São também apresentados os resultados da caracterização das nanopartículas recolhidas.

4.2.Resultados obtidos no NSAM

Os dados obtidos no procedimento experimental, para cada uma das misturas gasosas utilizadas nos ensaios, encontram-se representados graficamente nos pontos seguintes.

Dado o elevado número de gráficos, optou-se por apresentar um gráfico para cada mistura gasosa utilizada, englobando em cada um os modos de transferência conseguidos na experimentação, permitindo assim uma visualização mais fácil sobre a influência dos modos de transferência.

Uma vez que, na representação dos gráficos da área de superfície das partículas por volume pulmonar em função do tempo de soldadura, se registam valores instantâneos, optou-se por fazer uma integração das curvas obtidas, apresentando, assim, a área superficial depositada acumulada, durante o período de integração. Dividindo esta área acumulada pelo tempo de

duração da análise, obtêm-se os valores médios para cada ensaio, podendo assim comparar-se estes com os obtidos nos restantes ensaios.

Com os valores obtidos, traçaram-se gráficos da área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade, para permitir estudar a relação da emissão de nanopartículas com essa mesma intensidade.

4.2.1. Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 21

No capítulo 3.3.3 indica-se qual a velocidade de alimentação de fio utilizada para este ensaio.

A tabela 4.1 indica os parâmetros de soldadura medidos nestes ensaios.

Tabela 4.1. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 21

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	102	137	194
Tensão (V)	17,8	20	32,4
Tempo de soldadura (s)	59,9	49,47	34,07

Na figura 4.1 são apresentados os valores instantâneos obtidos neste ensaio.

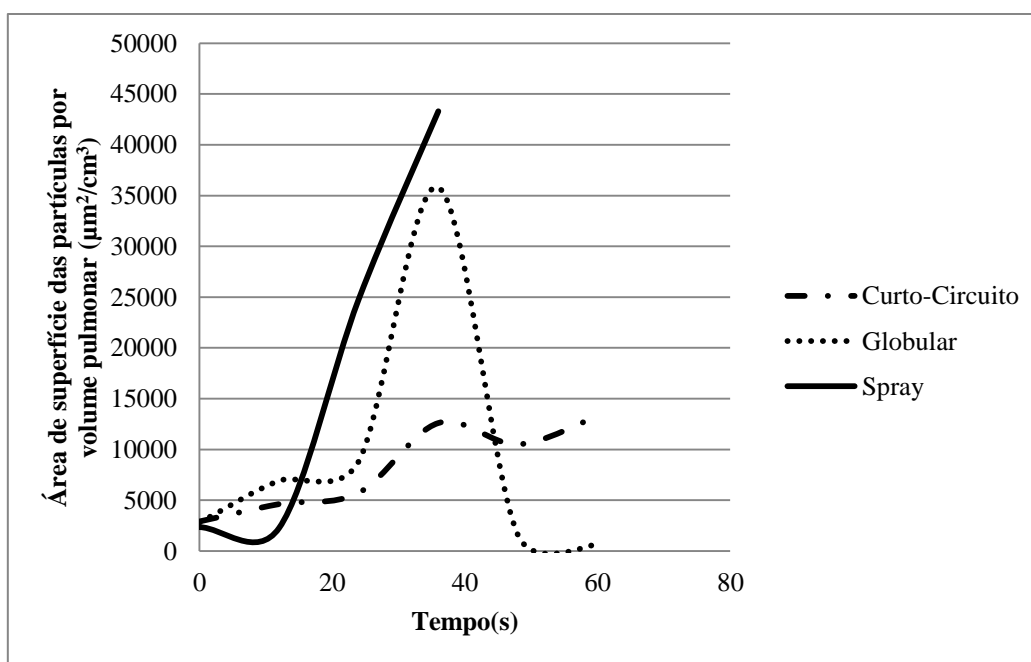


Figura 4.1. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 21

Como já referido no capítulo 3.4.2, as medições foram efectuadas na tocha de soldadura. Para os parâmetros utilizados, o maior valor de área da superfície das partículas por volume pulmonar com maior capacidade de deposição alveolar, foi de 43300 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), o que corresponde ao modo de transferência por *spray*.

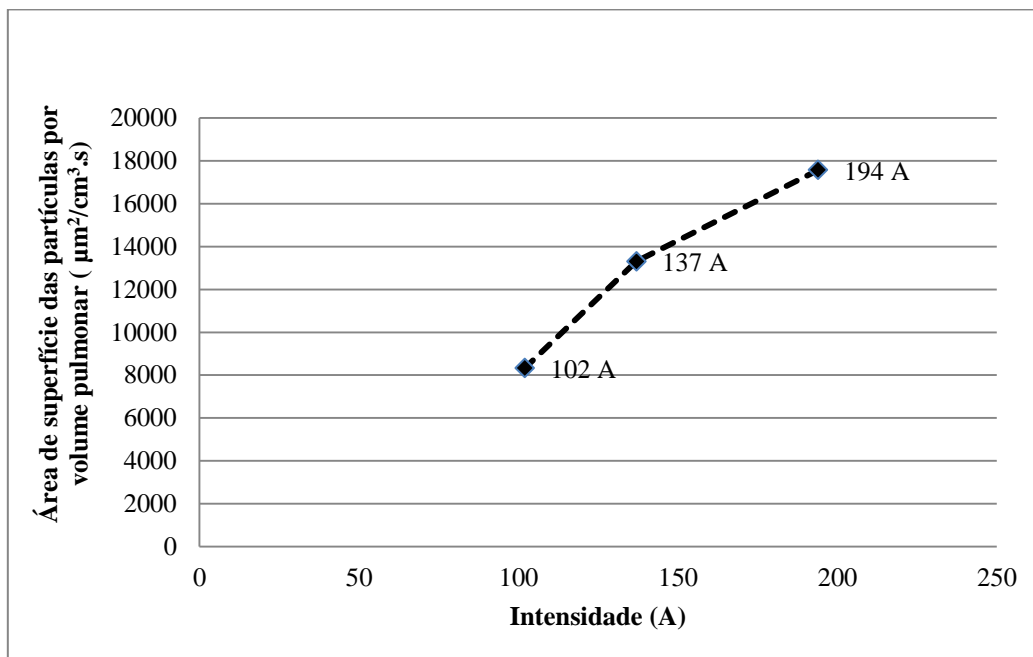


Figura 4.2. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 21

A figura 4.2 representa os valores médios obtidos da área de superfície das partículas por volume pulmonar para cada ensaio em função da intensidade.

É possível observar que, à medida que aumenta a intensidade, aumentam também os valores de áreas superficiais de nanopartículas com capacidade de deposição alveolar.

4.2.2. Ensaio realizado com a mistura gasosa Atal

Na tabela 3.6, apresentam-se as velocidades de alimentação de fio utilizadas neste ensaio. Como referido anteriormente, com esta mistura gasosa, não foi possível atingir o modo de transferência por *spray* devido ao elevado teor de dióxido de carbono presente na mistura.

Os parâmetros de soldadura medidos para este ensaio apresentam-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Atal

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Intensidade (A)	92	122	-
Tensão (V)	17,7	19,9	-
Tempo de soldadura (s)	61,41	65,15	-

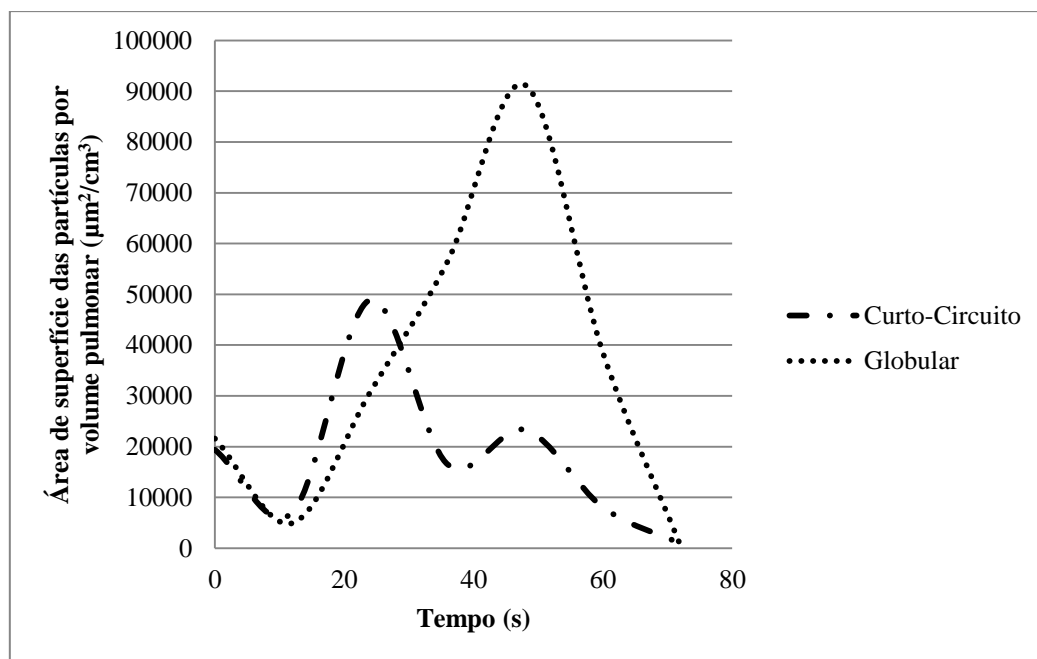


Figura 4.3. Ensaio para a mistura gasosa Atal

Na figura 4.3, é possível verificar que o maior valor de área de superfície das partículas por volume pulmonar, com maior capacidade de deposição alveolar, é de 91200 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), sendo este valor atingido para o modo de transferência globular. Verifica-se que, em termos de área dos picos obtidos, o modo de transferência globular é muito superior em relação ao pico obtido com o modo de transferência por curto-circuito.

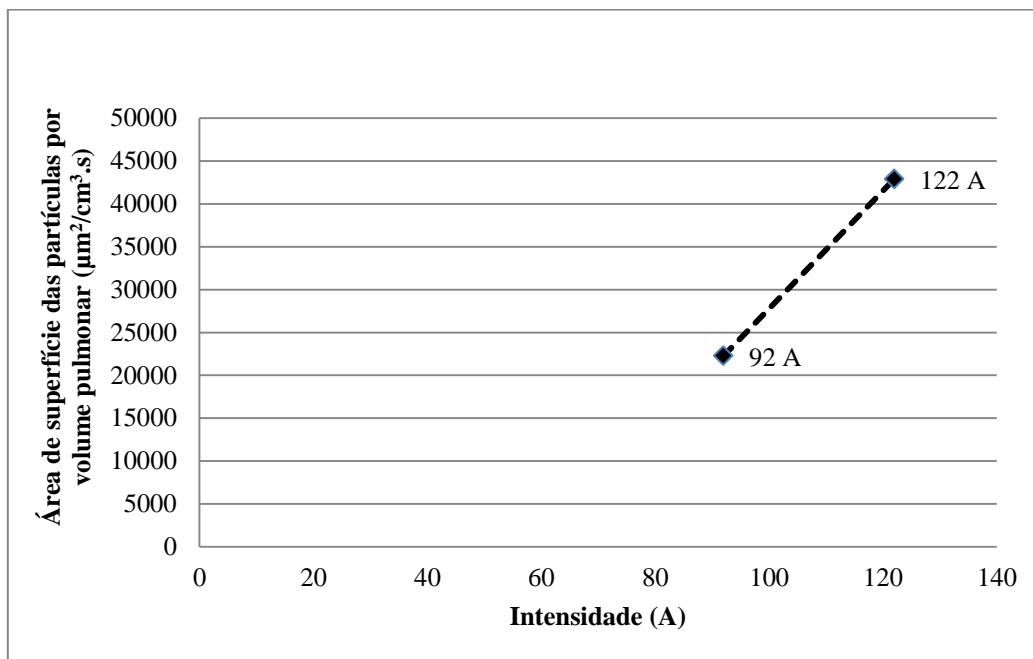


Figura 4.4. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Atal

Na figura 4.4 verifica-se, mais uma vez, que, com o aumento da intensidade, aumenta também a área de superfície das partículas por volume pulmonar.

4.2.3. Ensaio realizado com o gás dióxido de carbono

Recorrendo a este gás de protecção, na soldadura por fusão pelo processo MAG, não é possível atingir o modo de transferência por *spray*, pelos motivos que já foram descritos no capítulo 3.3.2. Neste ensaio apresentam-se, apenas, dois modos de transferência.

A tabela 4.3 indica os parâmetros medidos nestes ensaios.

Tabela 4.3. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo ao gás 100 % CO₂

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	Spray
Intensidade (A)	64	129	-
Tensão (V)	18,7	21,1	-
Tempo de soldadura (s)	71,13	76,85	-

Na figura 4.5 são apresentados os valores instantâneos obtidos neste ensaio, durante a fase de soldadura.

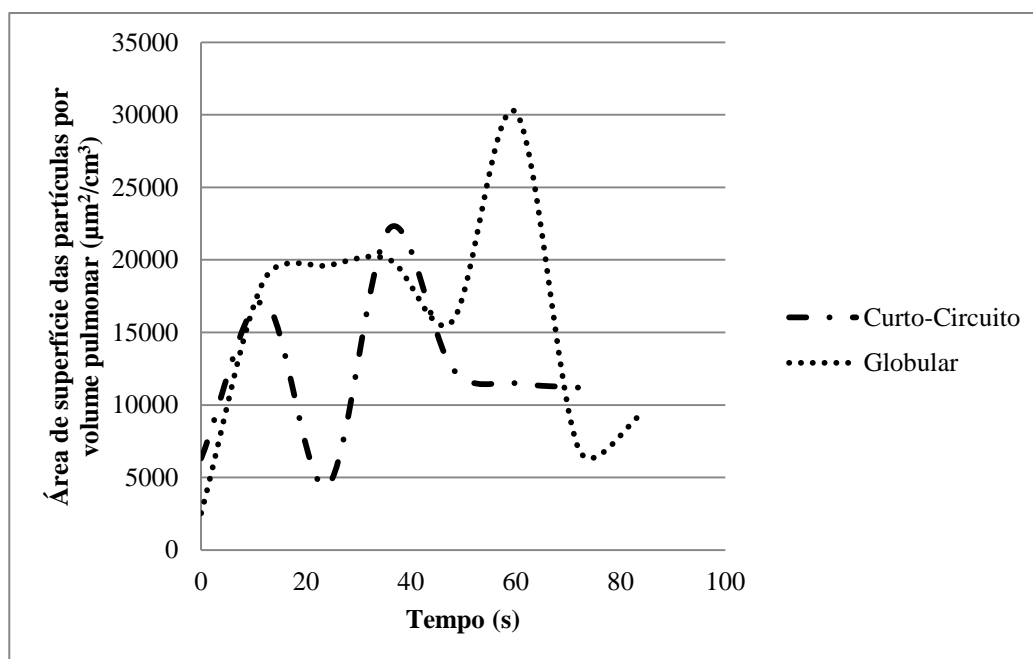


Figura 4.5. Ensaio para o gás 100 % CO₂

Assim como nos casos anteriores, o pico mais alto é registado no modo de transferência cujos parâmetros são mais elevados. Neste caso, isto acontece no modo de transferência globular, em que o maior valor de área de superfície das partículas por volume pulmonar, com maior capacidade de deposição alveolar, é de 30200 µm²/cm³.

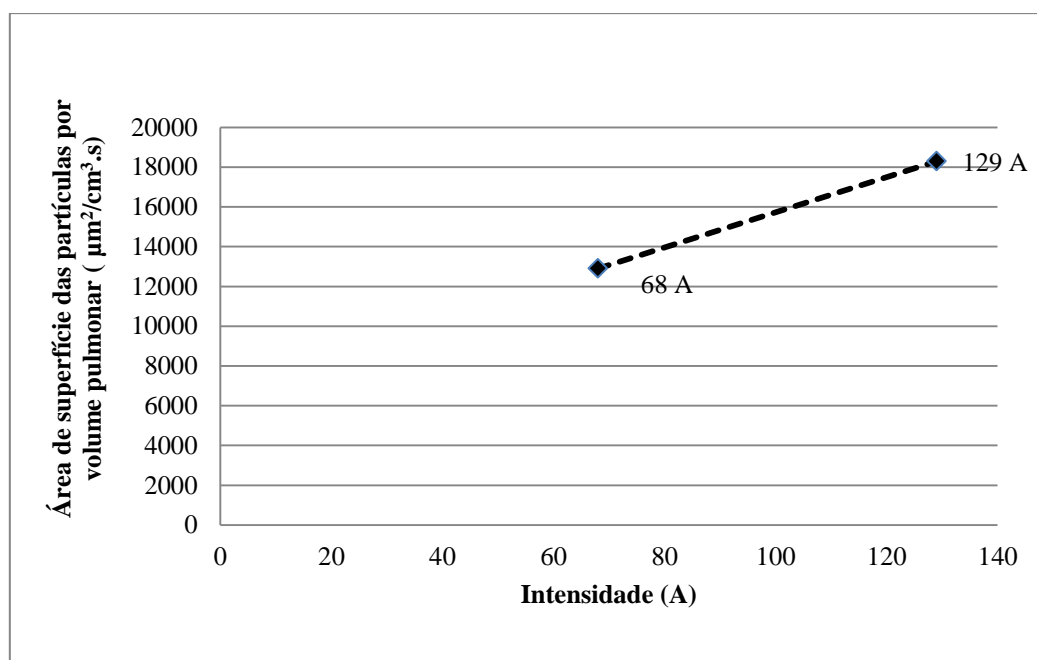


Figura 4.6. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para o gás 100 % CO₂

Na figura 4.6 está representado o gráfico dos valores médios obtidos da área da superfície das partículas por volume pulmonar. É possível verificar que, à medida que aumenta a intensidade, maior é a capacidade de deposição alveolar das partículas libertadas durante a soldadura.

4.2.4. Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 121

Neste ensaio as medições foram realizadas no interior da máscara do soldador, como é esquematizado na figura 3.10, sendo a soldadura manual.

A tabela 4.4 indica os parâmetros de soldadura medidos nos ensaios.

Tabela 4.4. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 121

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Intensidade (A)	133	171	199
Tensão (V)	18,8	25	29,9
Tempo de soldadura (s)	64,68	41,34	37,62

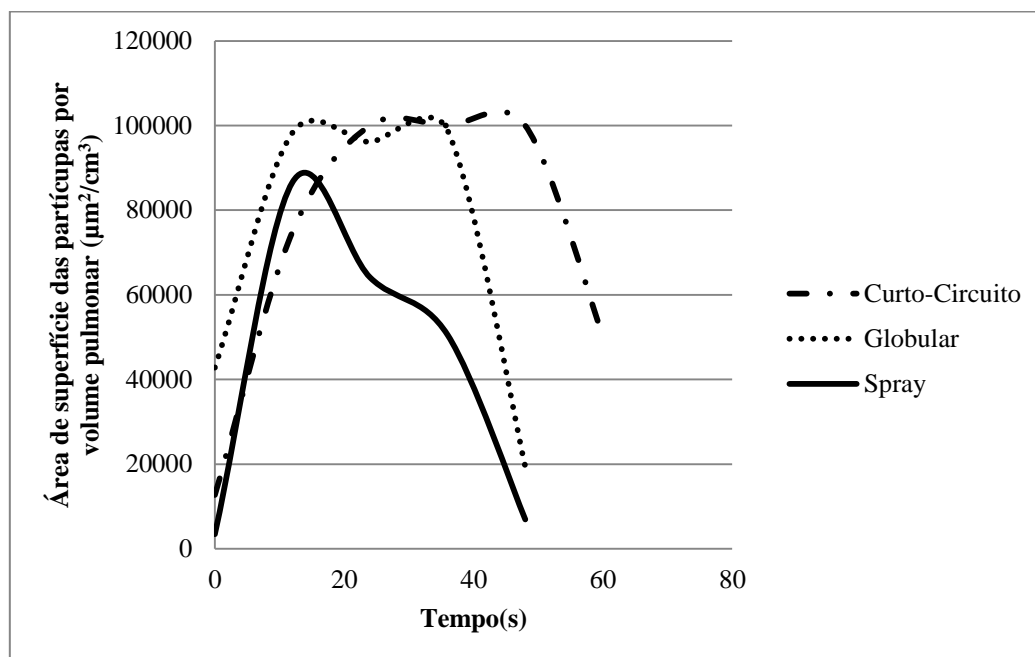


Figura 4.7. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 121

A figura 4.7 apresenta os valores instantâneos obtidos durante os ensaios realizados para esta mistura gasosa. Neste ensaio seria de esperar obter-se o pico mais elevado para o modo de transferência por *spray*. Contudo, tal não aconteceu, pois o pico mais elevado verificou-se no modo de transferência por curto-circuito, registrando-se o valor de 100000 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$), (correspondendo à saturação do analisador) em três instantes durante a deposição dos cordões de soldadura.

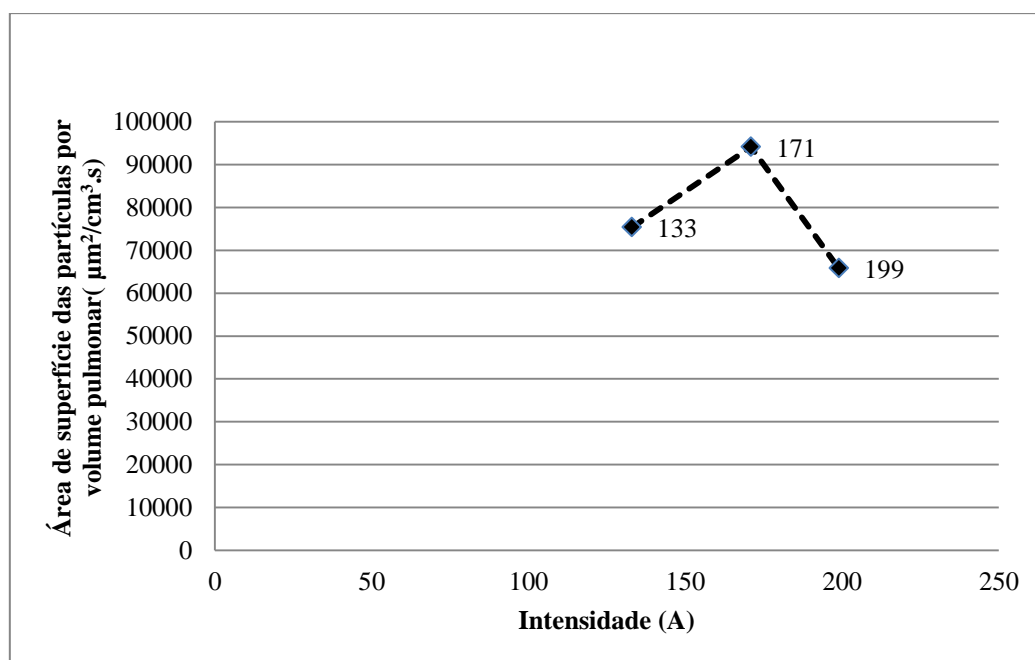


Figura 4.8. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 121

Observando a figura 4.8 verifica-se que há um decréscimo dos valores médios obtidos quando se passa do modo de transferência globular para o modo de transferência por *spray*. Este decréscimo não era esperado, uma vez que, à medida que aumentam os parâmetros de soldadura, maior será a taxa de formação de fumos.

4.2.5. Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 129

É importante referir que, neste ensaio, as medições foram realizadas no interior da máscara do soldador.

A tabela 4.5 apresenta os parâmetros de soldadura medidos no ensaio.

Tabela 4.5. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Intensidade (A)	109	185	226
Tensão (V)	19,1	25,2	30,8
Tempo de soldadura (s)	79,38	35,57	32,53

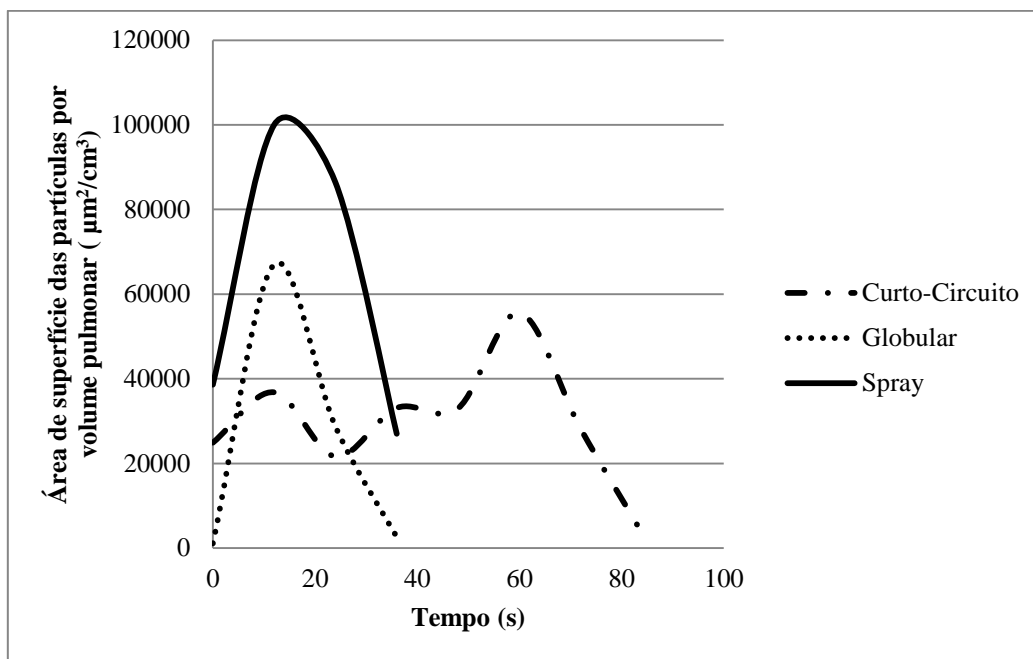


Figura 4.9. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 129

Na figura 4.9 apresentam-se os valores instantâneos obtidos neste ensaio para os diferentes modos de transferência. Mais uma vez se verifica a tendência dos ensaios anteriores, em que o pico mais alto da área da superfície das partículas por volume pulmonar, ocorre no modo de transferência por *spray*.

Neste ensaio, para o modo de transferência por *spray*, o aparelho atingiu o seu limite máximo de 100000 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).

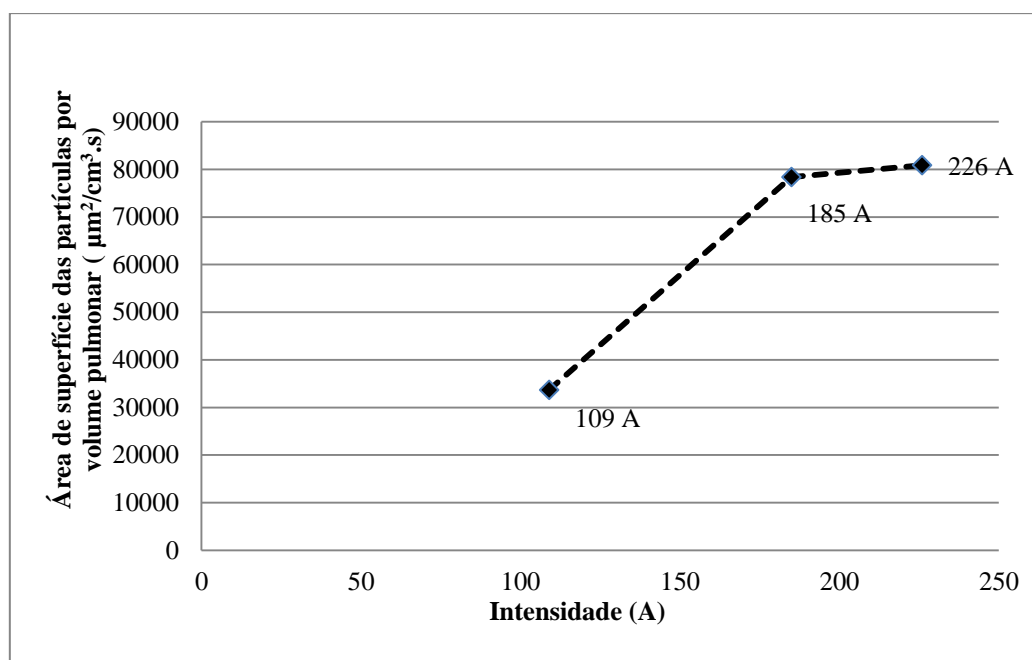


Figura 4.10. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 129

Na figura 4.10 estão representados os valores médios obtidos para a área de superfície das partículas por volume pulmonar para este ensaio. Verifica-se um aumento da área de superfície, por volume pulmonar, à medida que aumentam os valores dos parâmetros de soldadura. Há um aumento acentuado quando se passa do regime de curto-circuito para globular, e um pequeno aumento quando se passa do regime globular para *spray*, sendo os valores médios medidos de 78361 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$), para o regime globular e 80861 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$), para o regime por *spray*, respectivamente.

4.2.6. Ensaio realizado com a mistura gasosa Arcal 12

Estas medições foram, igualmente, efectuadas na parte interior da máscara de soldadura.

Os parâmetros de soldadura medidos para estes ensaios são os que se apresentam na tabela 4.6.

Tabela 4.6. Parâmetros de soldadura obtidos no ensaio, recorrendo à mistura gasosa Arcal 129

Modo de transferência	Curto-Circuito	Globular	<i>Spray</i>
Intensidade (A)	92	182	211
Tensão (V)	18,9	25	30,2
Tempo de soldadura (s)	72,96	38,43	35,08

Pela figura 4.11 verifica-se que o modo de transferência por *spray* atinge o pico mais elevado, neste caso de $51700 \text{ } (\mu\text{m}^2/\text{cm}^3)$. Os picos obtidos, tanto para o modo de transferência por *spray* como para o globular são bastante semelhantes, sendo que a variação dos valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, como se observa na figura 4.12 não se alteram significativamente, sendo muito próximos.

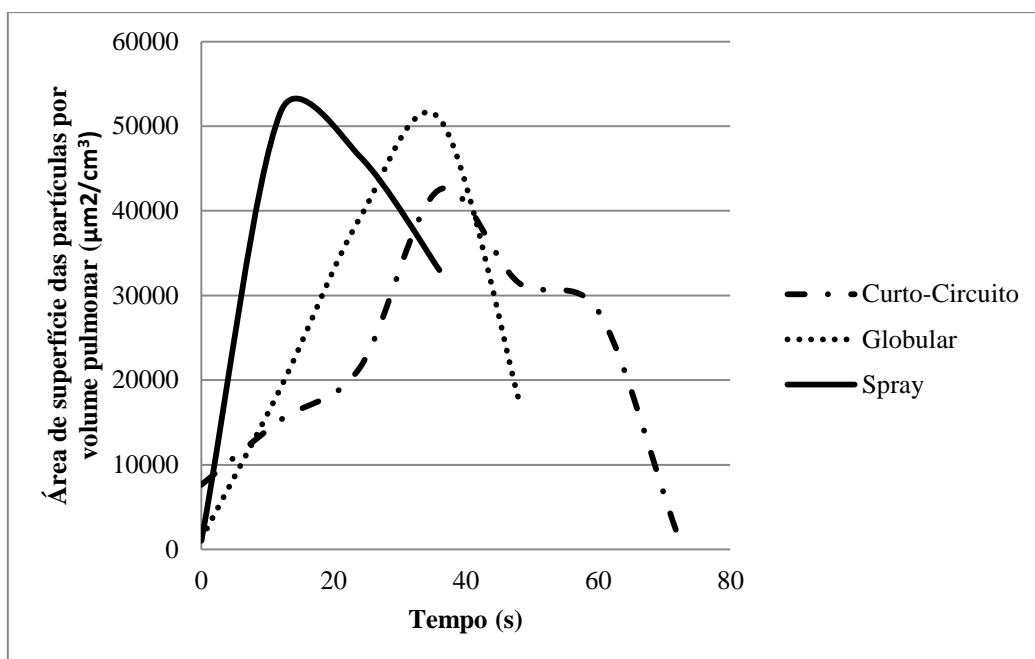


Figura 4.11. Ensaio para a mistura gasosa Arcal 12

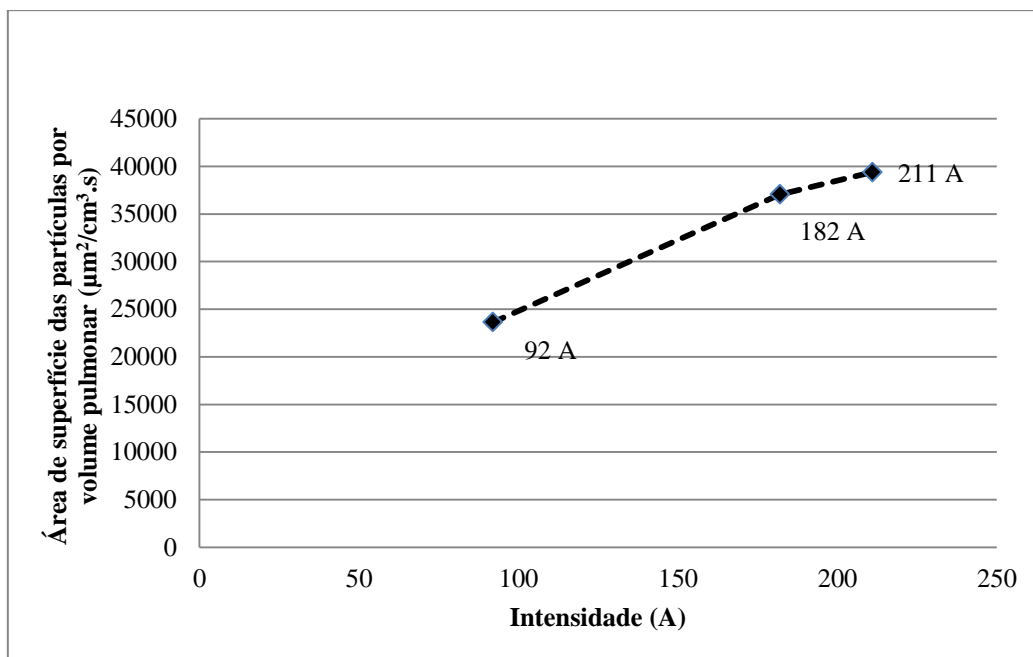


Figura 4.12. Área de superfície das partículas por volume pulmonar em função da intensidade para a mistura gasosa Arcal 12

Como se pode verificar na figura 4.12, neste ensaio houve um aumento da área de superfície das partículas por volume pulmonar. De facto, para uma intensidade de 92 A, o valor médio medido foi de 23637 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$); e quando se deu um aumento de intensidade para 182 A o valor médio medido passou para 37054 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$). Aumentando-se, ainda, mais a intensidade, já não se regista um aumento tão significativo, obtendo-se um valor médio de 39376 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$).

4.3. Discussão dos resultados obtidos no NSAM

Os resultados obtidos nestes ensaios, são o tempo de execução necessário para obtenção dos cordões de soldadura, variando entre os 30 e os 84 segundos, o que dependeu do modo de transferência utilizado. Assim, não foi possível realizar todos os ensaios com o mesmo tempo, pois os diferentes modos de transferência exigem velocidades de soldadura diferentes. Além disso, a realização dos ensaios foi limitada pelas dimensões das chapas disponíveis.

Nos gráficos apresentados no capítulo 4.2, é possível observar os picos obtidos durante o processo de soldadura.

Verifica-se também que os modos de transferência e as misturas gasosas escolhidas para os ensaios realizados, influenciam em muito a emissão de nanopartículas durante a fase de soldadura.

Na tabela 4.7 apresenta-se um resumo dos valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, para os ensaios realizados sendo o material de base o aço ao carbono.

Tabela 4.7.Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios com o material de base aço ao carbono

	Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$)		
	Arcal 21	Atal	Dióxido de Carbono
Curto-circuito	8325	<u>22266</u>	12899
Globular	13306	<u>42896</u>	18292
<i>Spray</i>	<u>17574</u>	-	-

Como se verifica na tabela 4.7, o modo de transferência tem uma grande influência na emissão das nanopartículas. Para a mistura gasosa Arcal 21, o modo de transferência por *spray* é aquele que, em média, apresenta maior área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Para este material de base, esta tendência verifica-se, igualmente, nas restantes misturas gasosas utilizadas: à medida que aumentam os parâmetros de soldadura (intensidade), aumenta também a área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

Seria de esperar que, em termos de gás de soldadura utilizado, o dióxido de carbono fosse aquele que apresentasse valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar superiores. Tal não aconteceu, pois foi a mistura gasosa Atal (composta por 82 % argon e 18 % de dióxido de carbono) que apresentou os maiores valores da área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

É importante realçar também que, a mistura Atal apresentou valores superiores no modo de transferência por curto-circuito, comparativamente aos outros gases utilizados em regimes de transferência, cuja intensidade é superior.

Tabela 4.8.Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar, obtidos durante os ensaios utilizando o material de base aço inoxidável austenítico

	Valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3.\text{s}$)		
	Arcal 12	Arcal 121	Arcal 129
Curto-circuito	23637	<u>75390</u>	33644
Globular	37054	<u>94136</u>	78361
<i>Spray</i>	39376	65829	<u>80861</u>

Na tabela 4.8 é possível observar que, nas três misturas gasosas indicadas, a área de superfície das partículas por volume pulmonar aumenta com o aumento da intensidade de soldadura, excepto no Arcal121, o que seria de esperar atendendo a que o modo de transferência por *spray* apresenta valores superiores ao do regime globular. Contudo, tal não aconteceu.

Uma das possíveis causas para que este valor tenha descido, no regime de *spray*, prende-se com os parâmetros de soldadura escolhidos. É possível que a intensidade utilizada (199 A) se situe na zona onde a taxa de formação de fumos é muito baixa, como se verifica na figura 2.16, originando, assim, um valor mais baixo em relação aos outros modos de transferência.

Como se pode verificar pelas figuras 4.7 e 4.8, assim como pela tabela 4.8 o Arcal 121 é a mistura gasosa que apresenta valores mais elevados para a área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

Uma das possíveis causas para que esta mistura gasosa apresente estes valores é a percentagem de hélio presente na mistura gasosa, de cerca de 18 %. Como o hélio apresenta uma elevada energia de ionização (24,58 eV), vai dar origem a um arco com maiores temperaturas, tendo como consequência provocar uma maior volatilização de elementos do fio sólido e do material de base.

Pelos resultados obtidos, para a soldadura de aço inoxidável austenítico, verificou-se que os valores da área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar foram superiores, em relação á soldadura das chapas de aço ao carbono, o que pode ser explicado pela escolha do local de recolha das nanopartículas: para a soldadura do aço inoxidável o ponto de recolha situava-se a uma altura superior em 160 mm relativamente à recolha na deposição de cordões de soldadura no aço ao carbono.

4.4. Resultados da microscopia

Relativamente às partículas recolhidas pelo amostrador NAS foi possível a análise química e morfológica recorrendo a um microscópio electrónico de transmissão (TEM), acoplado a uma sonda de análise de elementos leves (EDS).

4.4.1. Resultados da análise morfológica

Nas figuras 4.13 e 4.14 são apresentadas imagens captadas em microscopia electrónica de transmissão TEM, para as nanopartículas emitidas durante a deposição de cordões de soldadura com o material de base aço ao carbono (S235 JR), utilizando a mistura gasosa Arcal 21 (90 % árgon; 10 % CO_2).

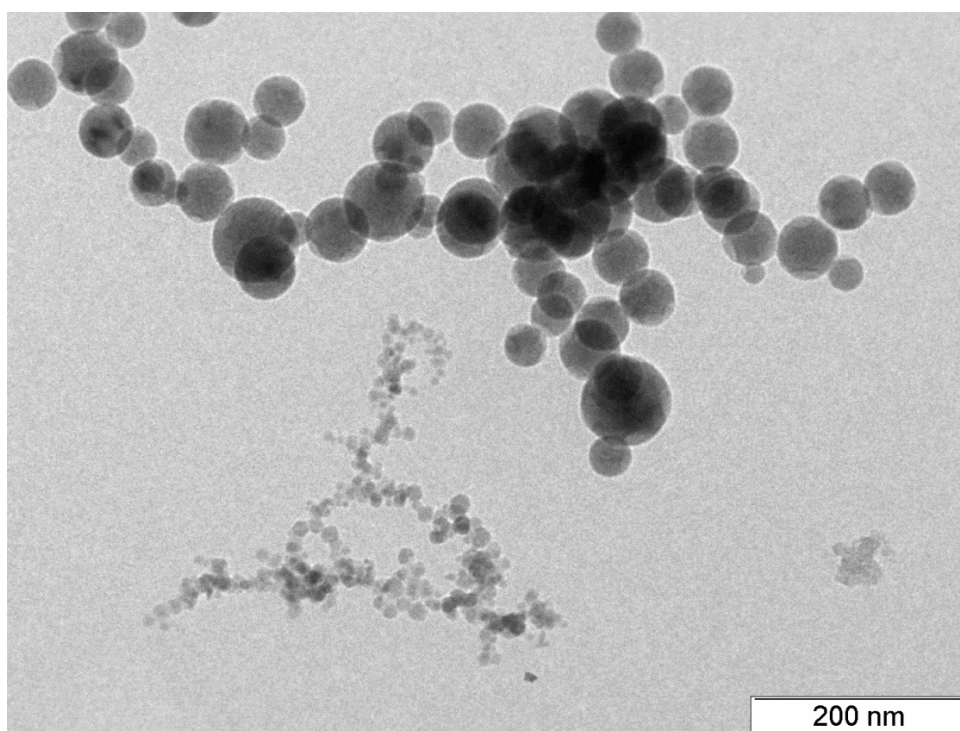


Figura 4.13. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 21, a uma escala de 200 nm

As partículas representadas na figura 4.13, são partículas esféricas, amorfas, e com dimensões mínimas na ordem dos 10 nm, sendo que as partículas com maior dimensão não excedem os 90 nm. É possível verificar também que as partículas se encontram em conjuntos de aglomerados, sendo mais visível esta característica na figura 4.14.

Como se pode verificar pela figura 2.20, a maior percentagem de eficiência de deposição da região alveolar, situa-se para as partículas com dimensões entre os 10 e os 100 nm. Conforme se verificou na figura 4.13, as dimensões das partículas situa-se entre estes valores, pelo que as partículas recolhidas apresentam uma grande capacidade de deposição alveolar.

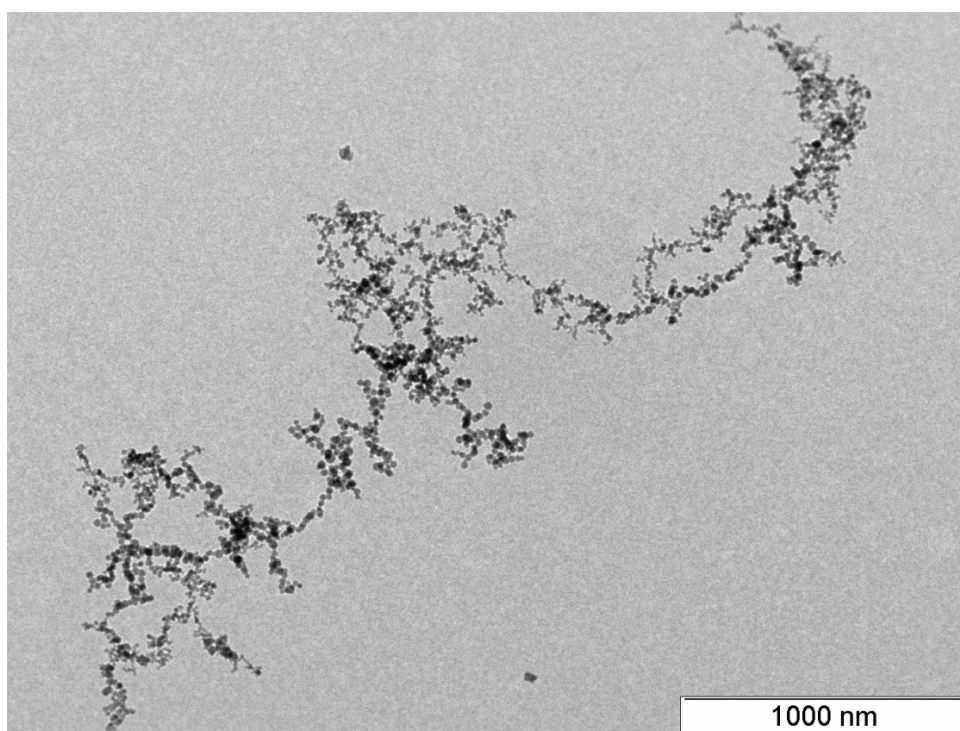


Figura 4.14. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 21, a uma escala de 1000 nm

Nas figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas imagens captadas, através de microscopia eletrônica de transmissão TEM, de nanopartículas emitidas durante a deposição de cordões de soldadura no material de base aço inoxidável austenítico (AISI 304), utilizando a mistura gasosa Arcal 121 (81% argon, 18% hélio e 1% de CO₂).

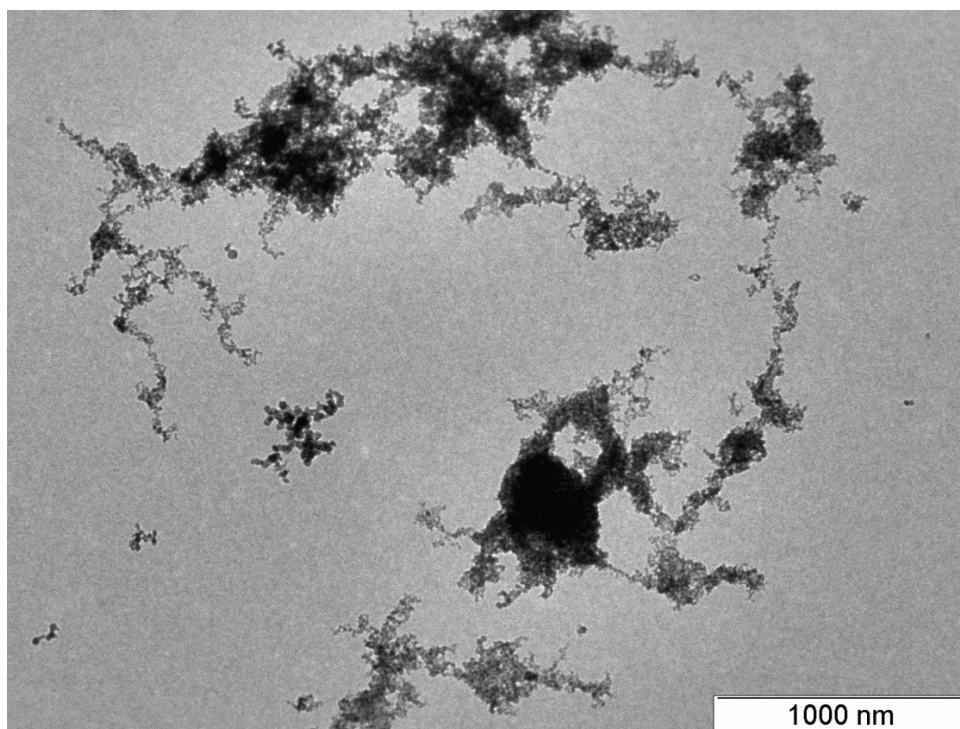


Figura 4.15. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 121, a uma escala de 1000 nm

Na figura 4.15, podem observar-se grandes aglomerados de partículas, e em muitas zonas, sobreposição de partículas.

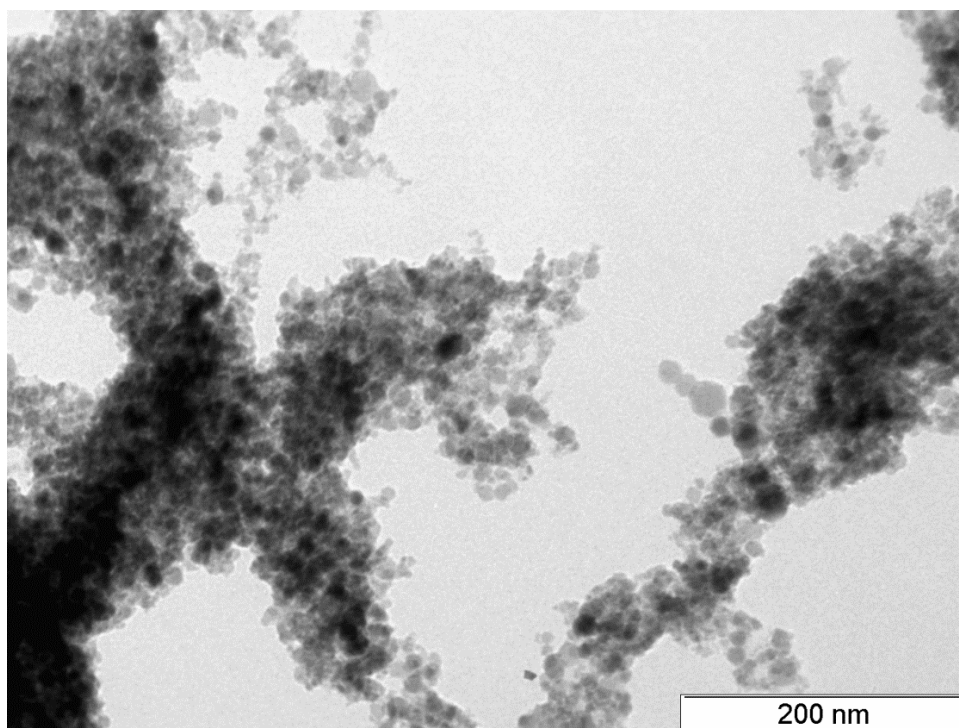


Figura 4.16. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 121, a uma escala de 200 nm

Também na figura 4.16, se verifica a existência de uma grande aglomeração das partículas recolhidas. É possível verificar que existe um grande aglomerado de partículas com dimensões que vão desde os 4 aos 30 nm, sendo que, em grande maioria, estão presentes partículas com dimensões superiores a 10nm. As partículas com dimensões até aos 10 nm não apresentam grande capacidade de deposição alveolar, quando comparadas com as partículas com dimensões superiores a 10 nm, como se pode verificar na figura 2.20.

É importante realçar também que foi esta mistura gasosa que apresentou, em média, maiores valores de área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.

Nas figuras 4.17 e 4.18 são apresentadas imagens captadas, através de microscopia electrónica de transmissão TEM, para as nanopartículas emitidas durante a deposição de cordões de soldadura como material de base aço inoxidável austenítico (AISI 304), utilizando a mistura gasosa Arcal 129 (por 91% árgon, 5% hélio, 2% CO₂ e 2% de azoto).

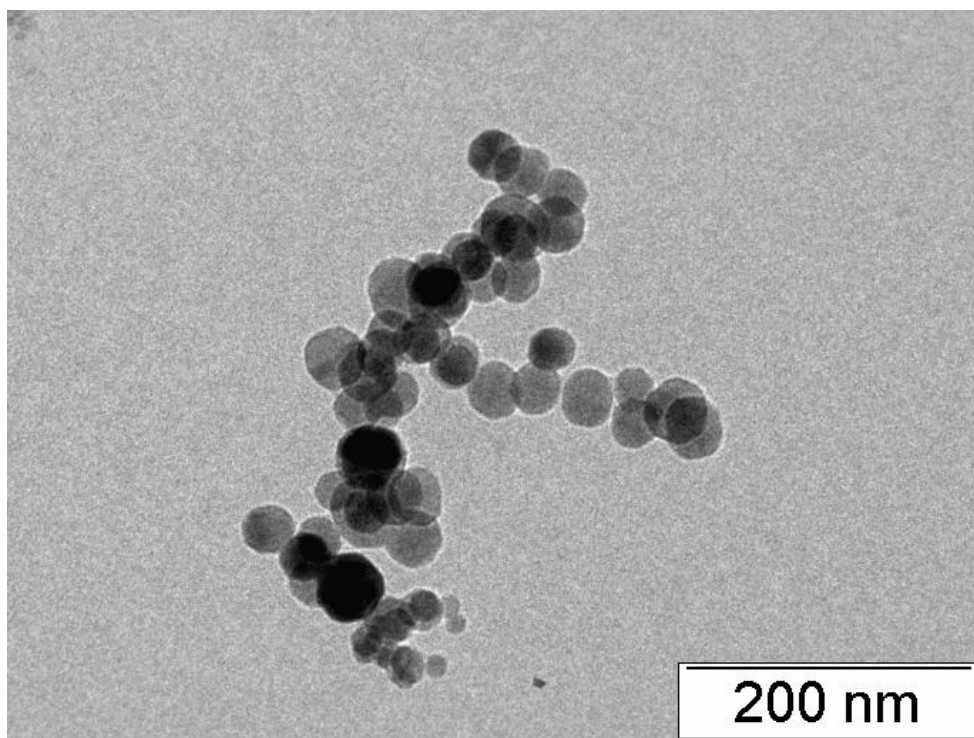


Figura 4.17. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 129, a uma escala de 200 nm

Pela figura 4.17, verifica-se que as partículas recolhidas, apresentam uma forma esférica bem definida, são partículas amorfas e estão presentes em aglomerados, embora seja possível verificar que algumas que se encontram isoladas. As suas dimensões situam-se na gama dos 10 aos 40 nm, sendo a maioria composta por partículas com dimensões próximas dos 40 nm.

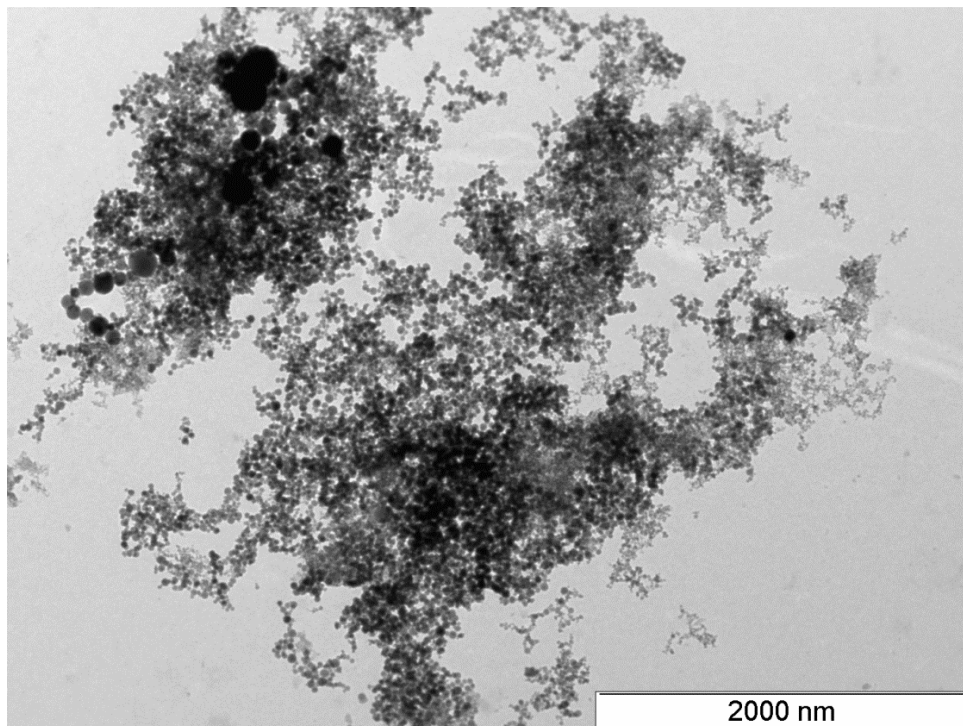


Figura 4.18. Imagem TEM de nanopartículas para a mistura gasosa Arcal 129, a uma escala de 2000 nm

Na figura 4.18, verifica-se a existência de um aglomerado de partículas, que também apresentam sobreposição, embora menor do que no caso da mistura gasosa Arcal 121, como se verifica nas figuras 4.15 e 4.16.

4.4.2. Resultados da análise química

A figura 4.19 apresenta o espectro, que resulta da análise, por espectroscopia de raio x por dispersão de energia (EDS), às nanopartículas recolhidas durante a deposição de cordões de soldadura com o material de base aço ao carbono, utilizando como consumível o fio sólido ER 70S-6 e como mistura gasosa o Arcal 21.

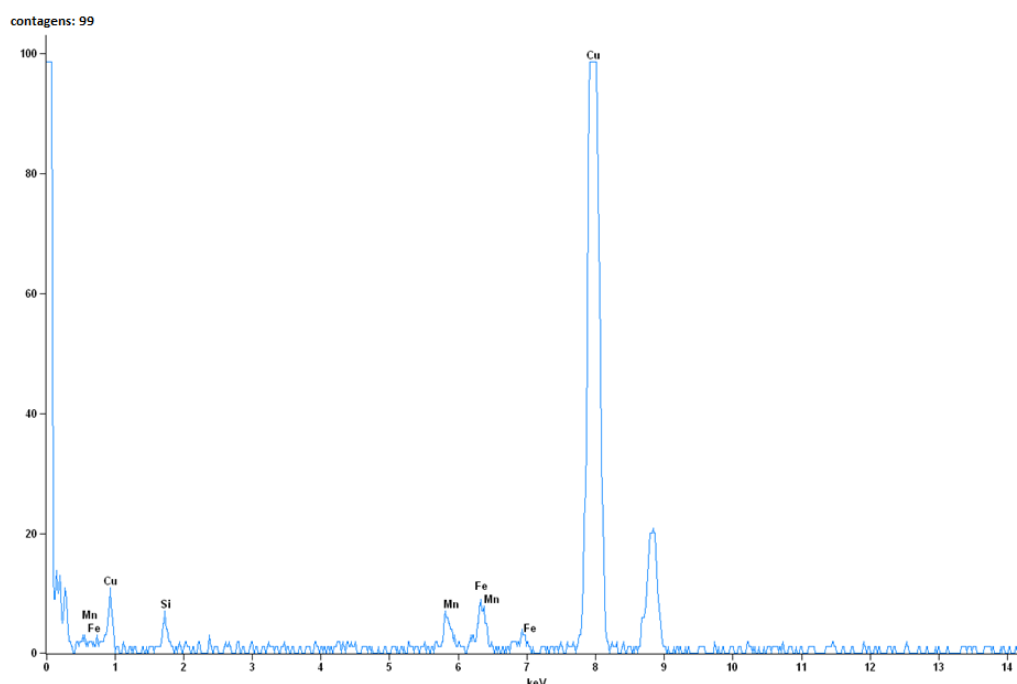


Figura 4.19. Análise EDS para o aço ao carbono, com mistura gasosa Arcal 21

Esta análise revelou a presença de ferro, silício e manganês, que são provenientes do material de base ou do material de adição. Seria de esperar uma maior quantidade de ferro, pois este elemento existe em maior quantidade do que os restantes, como é possível verificar nas tabelas 3.1 e 3.3.

De notar que o cobre presente no espectro, é proveniente da grelha utilizada para a captura das partículas pelo que a sua presença não é significativa.

A figura 4.20 apresenta o espectro, que resulta da análise, por espectroscopia de raio x por dispersão de energia (EDS), das nanopartículas recolhidas durante a deposição de cordões de soldadura com o material de base aço inoxidável austenítico, utilizando como consumível o fio sólido ER 316 LSi e como mistura gasosa o Arcal 129.

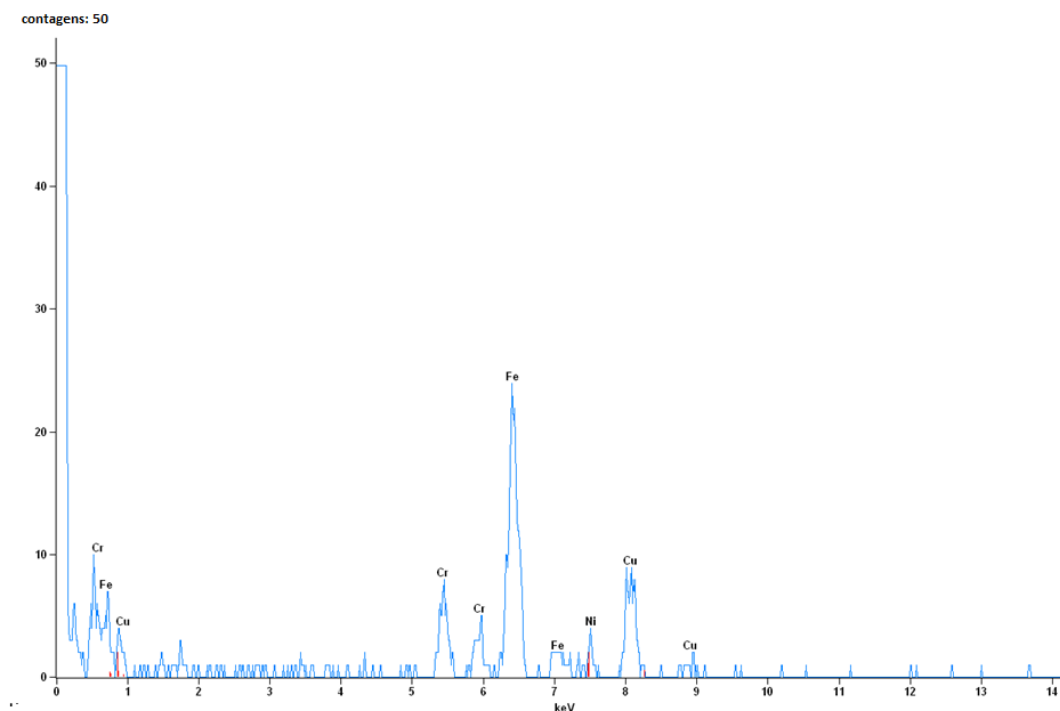


Figura 4.20. Figura 4.21. Análise EDS para o aço inoxidável austenítico, com mistura gasosa Arcal 129

A microanálise efectuada revelou a presença de ferro, crómio e níquel, que são elementos presentes no material de base e no material de adição, sendo estes os componentes principais do aço inoxidável austenítico.

Como anteriormente, o cobre presente no espectro, é proveniente da grelha utilizada para a captura das partículas, não sendo, por isso, significativo.

5. CONCLUSÕES

Do trabalho realizado é possível extrair as seguintes conclusões:

- À medida que aumentam os valores dos parâmetros de soldadura (intensidade, tensão), aumenta também o valor das áreas de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar.
- Para os modos de transferência em estudo, o modo de transferência por *spray* é aquele que apresenta valores superiores de área de superfície das partículas por volume pulmonar.
- O modo de transferência por curto-circuito apresentou valores médios da área de superfície das partículas por volume pulmonar menores para todas as misturas gasosas utilizadas neste trabalho. De salientar que neste modo de transferência os valores da intensidade de corrente e da tensão são baixos, fazendo com que o arco não apresente temperaturas tão elevadas, conduzindo a menor volatilização de elementos.
- Em relação ao modo de transferência globular para a maioria dos casos a média de partículas de área de superfície das partículas por volume pulmonar situou-se entre o modo de transferência por curto-circuito e por *spray*. Sendo este modo de transferência conhecido pela sua instabilidade de arco eléctrico, esta instabilidade não é a principal causa para a emissão de nanopartículas, mas sim a temperatura do arco eléctrico.
- Na deposição de cordões de soldadura sendo o material de base aço ao carbono, a mistura gasosa composta por 82% argon e 18% CO₂, apresentou partículas com um valor superior de área de superfície de partículas com capacidade de deposição alveolar. Este foi um resultado algo inesperado, já que estudos anteriores sobre a emissão de fumos na soldadura indicaram que a taxa de formação de fumos aumentava com a percentagem de dióxido de carbono presente na mistura. Assim, seria de esperar que com o CO₂ houvesse maior emissão de nanopartículas.

- Na deposição de cordões de soldadura com aço inoxidável austenítico, a mistura gasosa composta por 81% árgon, 18% hélio e 1% de dióxido de carbono foi a mistura gasosa que apresentou os maiores valores de área de superfície das partículas com capacidade de deposição alveolar. Estes valores são resultado da quantidade de hélio presente na mistura gasosa (18% He). Como o hélio é um gás que apresenta uma elevada energia de ionização, dá origem a um arco com temperaturas maiores, pelo que há uma maior volatilização dos elementos do fio sólido e do material de base.
- Em relação aos materiais de base utilizados, verificou-se que a soldadura do aço inoxidável austenítico é aquela que liberta uma maior quantidade de nanopartículas, expondo, assim, os trabalhadores a mais riscos de saúde. Também na análise química das partículas recolhidas, verificou-se a presença de níquel e cromo que são substâncias cancerígenas.
- As partículas recolhidas tanto para o aço ao carbono, como para o aço inoxidável austenítico apresentam dimensões nanométricas, estando a maioria situada entre os 10 e 100 nm.
- Da comparação entre as partículas recolhidas, foi possível verificar que para a mistura gasosa Arcal 121, as partículas apresentavam-se em grande número com dimensões entre os 10 a 40 nm, que são dimensões com grande capacidade de deposição alveolar.

Em futuros trabalhos, seria interessante fazer um estudo em que se verificasse o efeito do diâmetro do fio eléctrodo na emissão de nanopartículas, para o mesmo ponto de recolha e para o mesmo material de base.

Seria importante também estudar a influência da temperatura do arco eléctrico, na emissão de nanopartículas, para isso fazendo uma experimentação em que se conseguisse medir a temperatura do arco eléctrico.

Outra nota para um estudo futuro, seria fazer um estudo mais focado em misturas gasosas activas e verificar qual a sua relação com a emissão de nanopartículas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S.Escala, M.Nooij, and L.Quintino, “*Economically welding in a healthy way*”, presented at the 1st IIW South-East European Welding Congress, 2006
- [2] Marinov, Valery, *Manufacturing Technology*, 2004
- [3] I.Pires, L.Quintino, T.Rosado, and A.Costa, “*Influence of GMAW shielding gas in productivity and gaseous emissions*”, presented at the 10 International Aachen Welding Conference, 2007
- [4] J.F.Gomes, P.C.Albuquerque, R.M.Miranda, and M.T.Vieira, “*Determination of airborne nanoparticles from welding operations*”, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues*, 75:13-15; vol., pp. 747-755, 2012
- [5] Guerreiro, Carlos Leonel Farinha, “*Avaliação da emissão de nanopartículas de processo de soldadura por fusão*”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, FCT-UNL, Caparica, 2012
- [6] A.Anders, “*Tracking down the origin of arc plasma science- II. Early continuous discharges*”, *Plasma Science, IEEE Tansactions*, 2003
- [7] J.F.O.Santos and L.Quintino, *Processos de Soldadura*: ISQ, 1999
- [8] *Welding Handbook*: AWS, 1991
- [9] Rosado, Tobias Manuel Vilas-Boas, “*Inovação do processo MIG/MAG-Análise de produtividade e emissão de fumos*”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST-UTL, Lisboa, 2008
- [10] P.J.Modenesi, “*Introdução à física do arco eléctrico e sua aplicação na soldagem dos metais*”, 2007
- [11] Imagem adaptada site :<http://www.scielo.br/img/revistas/si/v14n3/a02fig01.gif>, acedida em 10 de Agosto de 2013
- [12] ESAB, *Soldagem MIG/MAG*, 2005
- [13] Imagem adaptada :
http://dc401.4shared.com/doc/nvL1CgfJ/preview_html_645018c3.jpg , acedido em 20 julho de 201
- [14] Imagem adaptada: <http://www.fimer.com/uk/saldatura/procedimentidisaldatura.asp>, acedido em 20 de Julho de 2013
- [15] Modultec:ISQ,[s,d]
- [16] AGA, *Facts about fume and gases*: Linde Group

Bibliografia

- [17] I.Pires,L.Quintino,R.M.Miranda and J.F.P.Gomes, “Fume emissions during gas metal arc welding”, Toxicological & Enviromental Chemistry, July-Sept, pp. 385-394, 2006
- [18] N.T.Jenkins, P.F.Mendez and T.W.Eager, “Effect of arc welding electrode temperature on vapor and fume composition”, presented at the International Conference on Trend in Welding Research, 2005
- [19] L.Matos, P.Santos and F.Barbosa, “As nanopartículas em ambientes ocupacionais”, Revista Segurança; Vol.202, pp.10-14, 2011
- [20] http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/3550_PN2980333_US-web.pdf, acedido em 10 de Agosto de 2013
- [21] http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf acedido em 10 de Agosto de 2013
- [22] http://rnme.up.pt/in2/rnme_pr_2ist_pt.htm, acedido em 12 de Agosto de 2013